Heikki Lehto • Raimo Havukainen • Jukka Maalampi • Janna Leskinen

FYSIIKKA 7

Sähkömagnetismi

Sanoma Pro Oy • Helsinki

Tiedustelut
Sanoma Pro Oy, Helsinki
puh. 020 391 000
sähköposti: asiakaspalvelu@sanomapro.fi

www.sanomapro.fi

Kustantaja: Sanoma Pro Oy

Tämä aineisto on digitaalinen rinnakkaisversio tuotteesta
ISBN 978-952-63-0125-9 Fysiikka 7

12 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2358-9
48 kk lisenssi ISBN 978-952-63-2359-6

Toimitus: Juho Niemelä, Sanna Niemelä
Typografia: Riitta Piuva
Kansi: Heli Ahola, Riitta Piuva
Kannen kuva: iStockphoto
Taitto: MacSet Oy / Tarja Lamberg
Piirrokset: Eila Sinivuori, Marja Venäläinen
Valokuvat: ks. s. 183

© Heikki Lehto, Raimo Havukainen, Jukka Maalampi, Janna Leskinen
ja Sanoma Pro Oy

Kopiointiehdot
Tämä teos on digitaalinen oppikirja, joka on suojattu tekijänoikeuslailla (404/61).

Sisällys

1 Magneettikenttä 7

Magnetismi on tuttu ilmiö 8

1.1 Magneettinen vuorovaikutus 9

Magneetti 9

Magnetismin mikrorakenne 12

Magneettikenttä 14

Maan magneettikenttä 18

Aine magneettikentässä 19

Ferromagneettinen aine 19

Para- ja diamagneettinen aine 21

1.2 Liikkuva varattu hiukkanen magneettikentässä 25

Magneettinen voima 25

Varatun hiukkasen rata magneettikentässä 28

Syklotroni 30

Massaspektrometri 32

1.3 Virtajohdin magneettikentässä 37

Virtajohtimen magneettikenttä 37

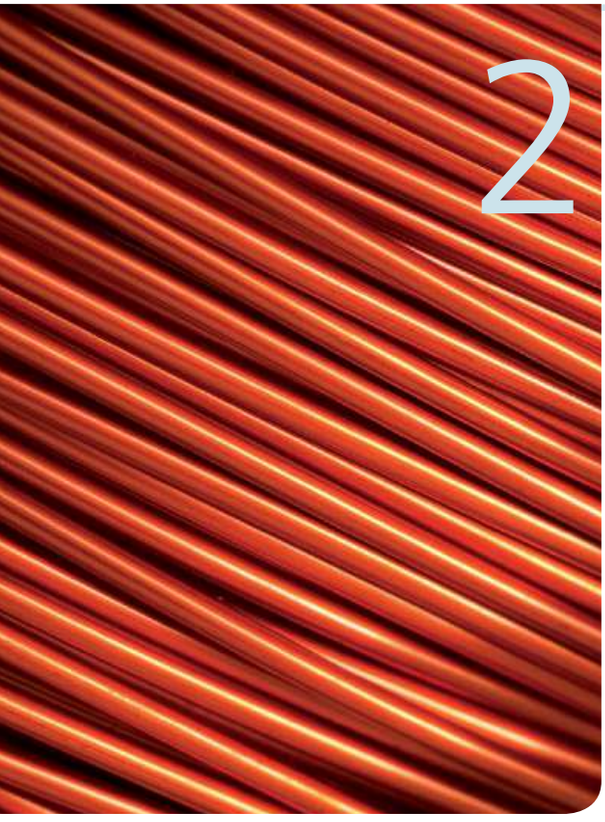
Virtajohdin ulkoisessa magneettikentässä 39

Yhdensuuntaisten virtajohtimien välinen vuorovaikutus 43

1.4 Käämi magneettikentässä 46

Käämin oikean käden sääntö 46

Momentti 47



2 Induktio 53

Sähkömagnetismin merkitys nyky-yhteiskunnalle on suuri 54

2.1 Sähkömagneettinen induktio 55

2.2 Induktiolaki 60

Liikkuva suora johdin ulkoisessa magneettikentässä 60

Johdinsilmukka ulkoisessa magneettikentässä 65

2.3 Itseinduktio ja magneettikentän energia 73

Itseinduktio 73

Magneettikentän energia 78

2.4 Pyörrevirrat 82

2.5 Generaattori 87

Vaihtovirta 95
Vaihtovirran tuottaminen on yksinkertaista ja taloudellista 96
Vaihtovirran historiaa 97
3.1 Vaihtovirta 98
Vaihtovirran synty ja perussuureita 98
3.2 Vaihtovirtapiirit 99
Vastus vaihtovirtapiirissä 100
Vaihtovirran ja -jännitteen teholliset arvot 102
Vaihtovirtapiirin impedanssi 105
Käämi vaihtovirtapiirissä 106
Kondensaattori vaihtovirtapiirissä 107
Vaihe-ero 108
Impedanssin riippuvuus taajuudesta 112
RCL-piiri 115
Vaihtovirran tasasuuntaus 118
3.3 Vaihtovirran teho 123
3.4 Muuntaja 127
Kolmivaihevirta 133
Sähköntuotanto 136
Energian siirto sähkön avulla 138
Tehohäviö energian siirrossa 140
Kodin sähköverkko ja sähköturvallisuus 142

Sähkömagneettinen värähtelypiiri 147
Sähkömagneettinen kenttä kuljettaa energiaa ja tietoa 148
4.1 Resonanssi 150
Resonanssitaajuus 150
Sähkömagneettinen värähtelypiiri 152
4.2 Antenni 158
Avoin värähtelypiiri 158
4.3 Sähkömagneettinen tiedonsiirto 163
Sähkömagneettisen aallon modulointi 166

Kertaustehtäviä 170
Vastauksia 178
Hakemisto 181

Opettajalle ja opiskelijalle

Fysiikka 7 -kirja sisältää lukiofysiikan seitsemännen kurssin Sähkömagnetismi oppiaineksen. Kirjan taustalla on pitkä kehitystyö sekä opettajilta saadut toiveet ja palauteet.

Kirjassa on selkeä ja havainnollinen esitystapa sekä moderni ja rauhallinen ulkoasu, joka houkuttelee tutkimaan kirjaa. Uuteen asiaan tutustutaan teoriatekstien, oppilastöiden ja esimerkkien sekä valokuvien, piirrosten ja kaavioiden avulla. Kirjan rakenne sallii eriyttämisen opettajan asettamien tavoitteiden mukaan.

Fysiikka 7 -kirja käsittelee sähkömagnetismiin liittyviä ilmiöitä, joissa kokeet ja teoria liittyvät läheisesti yhteen. Kirjassa on yksinkertaisin välinein toteutettavia oppilastöitä ja tietokoneavusteisia mittauksia. Tietokoneavusteiset mittaukset on esitelty niin, että työn toteutus käy selville, vaikka koulussa ei olisikaan käytettävissä tietokoneavusteista mittausjärjestelmää.

Fysiikan historian opiskelu auttaa ymmärtämään, miten fysiikan teoriat rakentuvat aikaisemman tiedon pohjalle ja miten ne ovat syntyneet lukuisten eri aikakausina työskennelleiden ihmisten ponnistelujen tuloksena. Tässä kirjassa fysiikan historiallinen tausta otetaan esille asiayhteydessään.

Kirjassa on runsaasti erityyppisiä tehtäviä: ajatuksia herättäviä **pohdi ja etsi** -tehtäviä, **perinteisiä laskutehtäviä**, opiskelijan itsearviointiin tarkoitettuja **testaa, osaatko** -tehtäviä sekä **kertaustehtäviä** kirjan lopussa. Kaikkia tehtäviä ei ole tarkoitus käsitellä oppitunneilla, vaan opiskelijan on hyvä edistää oppimistaan ratkaisemalla tehtäviä myös omatoimisesti. Tehtävien ratkaisut tulee opetella esittämään selkeästi ja perustellusti.

Opetussuunnitelman edellyttämät aihekokonaisuudet, kuten hyvinvointi ja turvallisuus sekä teknologia ja yhteiskunta, ovat kirjassa luontevasti mukana. Tieto- ja viestintätekniikkaan voidaan perehtyä hyvin pohdi ja etsi -tehtävien avulla. Myös työraporttien ja tutkielmien laadintaa on hyvä harjoitella tälläkin kurssilla.

Kirjaan liittyy runsaasti monipuolista oheismateriaalia.

Jatko-opintoja ajatellen fysiikan opiskelu lukiossa on tärkeää. Monet jatko-opiskelumahdollisuudet luonnontieteiden, lääketieteen, tekniikan, koulutuksen, tutkimuksen ja usein myös liike-elämän aloilla edellyttävät fysiikan opintoja jatkossa.

Menestystä fysiikan opiskeluun!

Toukokuussa 2011

Heikki Lehto, Raimo Havukainen,
Jukka Maalampi ja Janna Leskinen

Johdantotehtäviä

1. a) Mihin kompassia käytetään?
b) Miksi kompassi osoittaa pohjois- ja eteläsuunnan?
c) Missä on Maan magneettinen etelänapa?
d) Miksi kompassi voi näyttää virheellistä suuntaa maahan upotetun tasavirtakaapelin yläpuolella?

2. a) Miksi rautajauho tarttuu kiinni kestomagneettiin?
b) Onko magneettien välillä aina vetovoima?

3. a) Miten auringonpilkut liittyvät magnetismiin?
b) Miten revontulet liittyvät magnetismiin?

4. Mitä tarkoitetaan tasa- ja vaihtovirralla?

5. Yhtenä sähkömagnetismin tärkeimmistä keksinnöistä pidetään induktiota. Mitä sillä tarkoitetaan?

6. Sähkömagneettinen viestintä perustuu sähköisen värähtelypiirin toimintaan.
a) Mikä lähetinantennissa värähtelee?
b) Mikä ilmassa värähtelee?
c) Mikä vastaanottimessa värähtelee?

7. a) Mitä sähkö maksaa kotipaikkakunnallasi?
b) Tietokone ja saunan kiuas ovat päällä yhtä kauan. Miksi saunan kiukaan käyttäminen tulee sähkön osalta kalliimmaksi?

8. a) Näet tien varrella korkeajännitelinjan ja ison muuntajan. Miksi muuntajan varoitustaulussa muistutetaan hengenvaarasta?
b) Mitä tarkoittaa kännykkämuuntajan merkintä Input 230 V~/50 Hz/?

9. Miten italialainen *Guglielmo Marconi* (1874–1937) liittyy viestintään?

10. Onko kännykässä antenni?

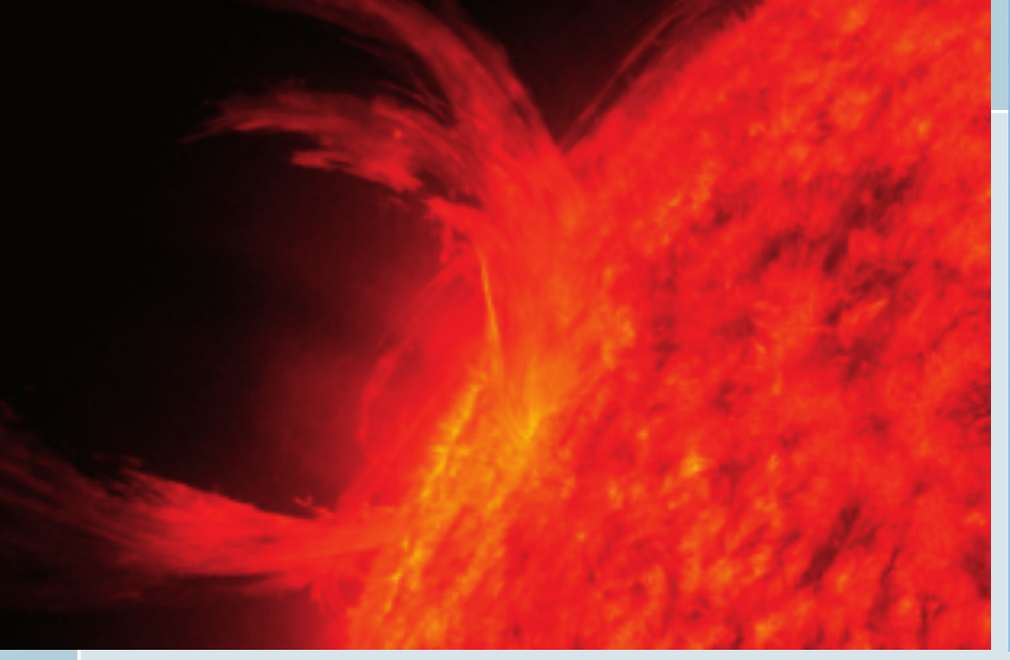
1 Magneettikenttä

Tässä luvussa opit

- magneettisen vuorovaikutuksen
- erimuotoisia magneettikenttiä
- magneettikentän sovelluksia
- sen, miten magneettikenttä vaikuttaa hiukkasiin, johtimeen ja käämiin.

Keskeisiä käsitteitä ovat

- magneetti ja magneettiset navat
- magneettikenttä
- magneettivuon tiheys
- magneettinen voima
- ferro-, para- ja diamagneettiset aineet.



Aurinkopurkaus voi aiheuttaa yhtäkkisen muutoksen Maan magneettikentässä. Näitä muutaman minuutin kestoisia muutoksia nimitetään usein magneettisiksi myrskyiksi.

Magneettisten malmiesiintymien etsimisessä voidaan käyttää apuna lentokoneeseen asennettua magnetometria. Laite havaitsee vaihtelut Maan magneettikentässä. Mahdolliset malmiesiintymät voidaan paikallistaa laitteen avulla.

Magnetismi on tuttu ilmiö

Antiikin Kreikassa tunnettiin 600-luvulla ennen ajanlaskumme alkua aine, joka veti rautaesineitä puoleensa. Sitä löytyi **Magnesian** alueelta, ja siksi ainetta ruvettiin kutsumaan magneetiksi. Kyseessä on eräs raudan oksidi. Kiinassa käytettiin magneettisia aineita suunnan määrityksessä noin 2000 vuotta sitten. Eurooppaan kompassi tuli arabialaisten mukana 1100-luvulla; skandinaavit käyttivät kompassia jo 1200-luvulla. Kompassi mahdollisti liikkumisen avomerellä.

Magnetismi on monelle tuttu ilmiö. Magneettikiinnikkeitä käytetään mm. kaappien ja ovien lukkoina, jääkaappien oviin muistilappuja kiinnitettäessä ja käsilaukkujen lukoissa. Monissa kodin laitteissa, esimerkiksi kaiuttimissa, on magneetti. Sirukorteissa on usein myös perinteinen magneettiraita, johon on tallennettu tietoa magneettisessa muodossa. Tallennus tehdään sähkövirran avulla. Sähkömagneeteilla voidaan siirtää rautaromua. Sähkömagneetin voimakkuutta voi säätää, ja tarvittaessa magneettisuus voidaan myös poistaa.

Maapallon ympärillä on magneettikenttä. Elämme jatkuvasti magneetin vaikutuksen eli magneettikentän alaisuudessa. Magneettikenttä suojaa maapalloa mm. kosmiselta hiukkassäteilyltä. Vapaasti kiertymään pääsevä kompassineula asettuu maanpinnalla Maan magneettikentän suuntaisesti. Monet eläimet, kuten muuttolinnut ja kilpikonnat, osaavat suunnistaa Maan magneettikentän avulla.

Nykyaikaisella magneettikuvauksella (*Magnetic Resonance Imaging*, MRI) voidaan kuvata tarkasti lähes kaikkia ihmisen elimiä, mutta eniten magneettikuvausta käytetään aivojen ja selkäytimen kuvantamisessa. Magneettikuvausta on pidetty läpimurtona lääketieteellisessä diagnostiikassa.

Yhteiskuntamme on riippuvainen sähköstä. Sähköä tuotetaan voimalaitoksissa generaattoreilla, joiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon.

Tulevaisuudessa luotijunat nopeuttavat liikkumista. Luotijunat liikkuvat magneettikentän kannattelemana ilmassa rataa koskettamatta. Luotijunat voivat tulevaisuudessa liikkua lähes lentokoneiden nopeudella.

1.1 Magneettinen vuorovaikutus

Magneetti

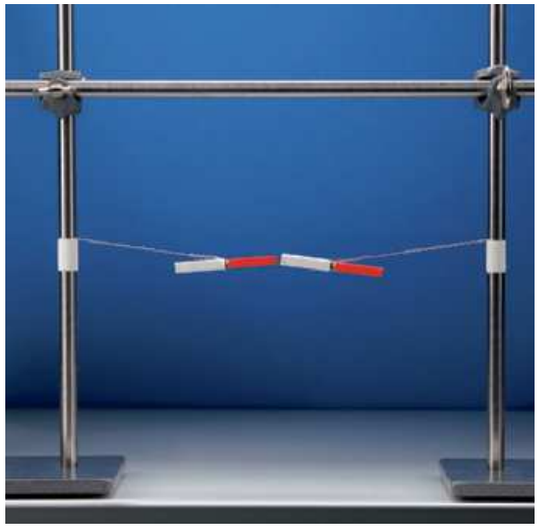
Oppilastyö ▪ Magneetit

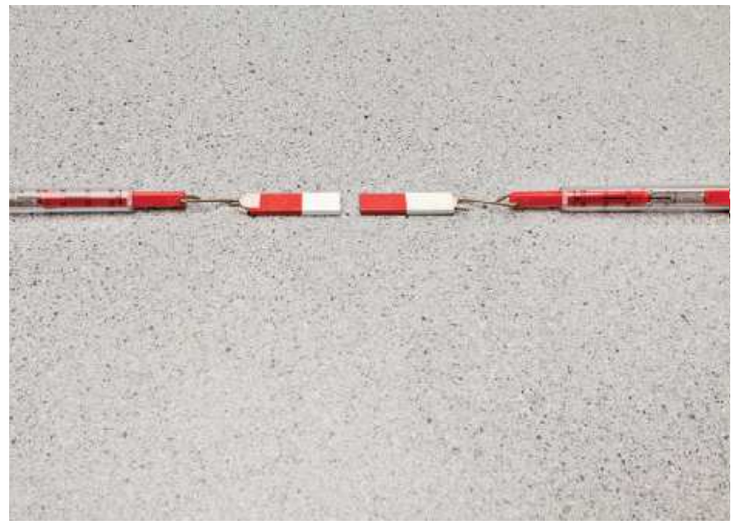
1. Aseta kaksi lankojen päissä olevaa kestomagneettia riippumaan vaaka-asennossa lähelle toisiaan. Muuta magneettien keskinäistä asemaa ja tutki magneettien vuorovaikutusta. Tutki edelleen magneettista vuorovaikutusta asettamalla toinen magneetti pöydän päälle ja liikuttamalla toista magneettia pöydän alla.

2. Tutki, miten magneetit käyttäytyvät toistensa läheisyydessä.

3. Rakenna sähkömagneetti käämistä ja rautasydämestä. Aseta kestomagneetti, joka on kiinnitetty (esimerkiksi teipillä) herkästi kääntyvään alustaan, lähelle käämin toista päätä. Kytke käämiin virta. Mitä havaitset? Siirrä vielä kestomagneetti käämin toiseen päähän ja tarkkaile magneetin asentoa.
Aseta käämi uudestaan samaan asentoon kuin kohdan 3 alussa. Muuta käämissä kulkevan sähkövirran suuntaa. Kytke käämiin virta. Mitä havaitset?

4. Kiinnitä kestomagneetin N-kohtio jousivaakaan esimerkiksi maalarinteipillä ja S-kohtio vastaavasti toiseen jousivaakaan. Vie kestomagneettien eri kohtiot toistensa lähelle, mutta älä anna niiden koskettaa toisiaan. Mitä havaitset jousivaakojen lukemista?





Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa havaittiin, että **magneettien välillä** on niiden asennosta riippuen **veto-, hylkimis- ja vääntövaikutuksia**. **Magneettinen vuorovaikutus** on **etävuorovaikutus**. Oppilastyön perusteella voidaan päätellä, että magneeteilla täytyy olla kaksi erilaista päätä eli kohtiota. Maan magneettikentässä vapaasti kiertymään pääsevän magneetin tai magneettineulan maantieteelliseen pohjoiseen kääntyvää päätä sanotaan **pohjoiskohtioksi** eli N-kohtioksi ja toista päätä **eteläkohtioksi** eli S-kohtioksi. Oppilastyön toisessa kohdassa havaittiin, että samannimiset kohtiot hylkivät toisiaan ja erinimiset vetävät toisiaan puoleensa. Jos magneettien välisten voimien vaikutussuorat eivät yhdy, magneetit pyrkivät kääntymään yhdensuuntaisiksi.

Käämistä rakennetussa sähkömagneetissa on oppilastyön kohdan 3 havaintojen perusteella myös kaksi eri kohtiota. Kestomagneetti oli vuorovaikutuksessa sähkömagneetin kanssa, kun sähkömagneetissa kulki sähkövirta. Oppilastyön kohdassa 4 todetaan, että magneettisessa vuorovaikutuksessa magneetteihin kohdistuvat voimat ovat yhtä suuret mutta vastakkaissuuntaiset Newtonin III lain mukaisesti. Magneettisessa vuorovaikutuksessa esiintyvää voimaa nimitetään **magneettiseksi voimaksi**. Tähän palataan tarkemmin myöhemmin tässä luvussa.

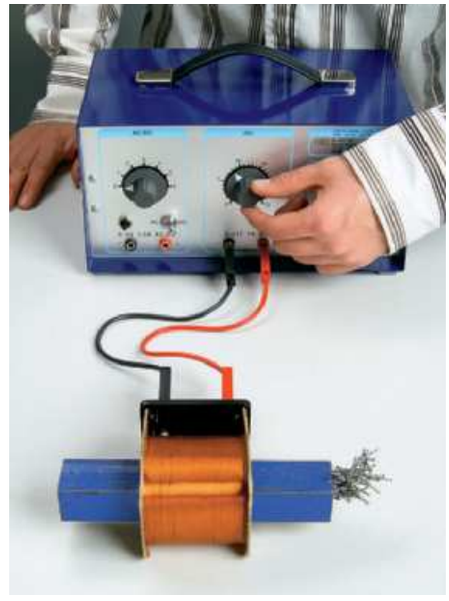
Magneettinen vuorovaikutus
Magneettinen vuorovaikutus on etävuorovaikutus.
Magneeteilla on kaksi kohtiota. Samannimiset kohtiot hylkivät toisiaan, ja erinimiset kohtiot vetävät toisiaan puoleensa.

Oppilastyö ▪ Magnetoituminen

1. a) Kaada pieniä rautanauloja pöydälle. Tarttuvatko ne toisiinsa? Tuo kestomagneetti lähelle nauloja. Mitä havaitset? Siirrä kestomagneetti kauemmas. Vie äsken kestomagneetissa kiinni olleet naulat aivan lähelle toisiaan. Tarttuvatko naulat toisiinsa?

b) Rakenna sähkömagneetti. Kytke magneettiin sähkövirta, jolloin rautanaulat tarttuvat kiinni siihen. Katkaise virta. Mitä havaitset?

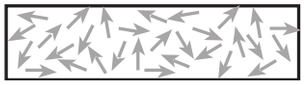
2. Sivele sukkapuikkoa tankomagneetilla yhdensuuntaisin vedoin. Kosketa sukkapuikolla rautanauloja. Mitä havaitset? Toista koe käyttäen teräslankaa. Katkaise teräslanka keskeltä ja tutki sen osien magneettisuutta.



Oppilastyössä havaittiin, että magneetti vetää puoleensa rautanauloja, vaikka rautanaulat eivät alun perin olleet magneettisia. Rautanaulojen tarttuminen magneettiin johtuu **naulojen magnetoitumisesta kestomagneetin magneettikentässä**. Naulat myös jäivät magneettisiksi joksikin aikaa. Kun sähkömagneetista katkaistiin sähkövirta, naulat irtosivat, joten virran katkaisun myötä magneettisuus poistui. Sukkapuikko saatiin magnetoitua hankaamalla sitä tankomagneetilla samansuuntaisin vedoin. Sukkapuikko jäi magneettiseksi; heikko magneettisuus voi säilyä pitkänkin aikaa. Kun oppilastyössä teräslanka katkaistiin, havaittiin, että langan molemmat osat ovat magneetteja eli niillä on sekä pohjois- että eteläkohtio.

Magnetismin mikrorakenne

Aineen magneettiset ominaisuudet liittyvät mikrotasolla elektronien liikkeisiin atomissa. Koska elektroni on varattu hiukkanen, sen liike ytimen ympärillä synnyttää magneettikentän. Elektronin pyöriminen itsensä ympäri (spin) synnyttää myös magneettikentän. Atomit ja molekyylit ovat tästä syystä kuin pieniä tankomagneetteja, **alkeismagneetteja**.

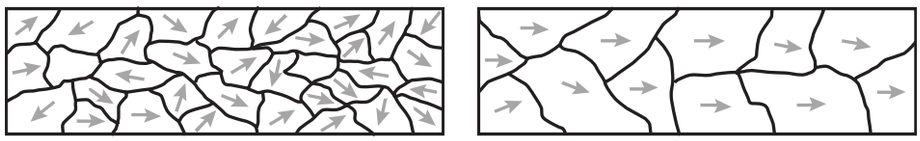


Piirroksessa olevat nuolet kuvaavat alkeismagneetteja, joiden suunnat ovat satunnaisia.

Atomien rakenne ja keskinäinen järjestys määräävät aineen magneettiset ominaisuudet. Ominaisuudet riippuvat siitä, kääntyvätkö aineen alkeismagneetit ulkoisen magneettikentän suuntaisiksi. Jos aineen alkeismagneetit ovat satunnaisessa järjestyksessä, kappale ei ole ulospäin magneettinen. Jos atomin tai molekyylin magneettinen momentti eroaa nollasta, ulkoinen magneettikenttä pyrkii suuntaamaan atomien magneettiset momentit siten, että ne vahvistavat ulkoista magneettikenttää aineessa. Alkeismagneettien suuntautuminen ilmenee aineen magnetoitumisena.

Ferromagneettisen aineen (ks. sivu 19) atomien välinen vuorovaikutus pyrkii suuntaamaan lähekkäisten atomien magneettiset momentit samansuuntaisiksi. Näin aineen sisään syntyy itsestään pieniä alueita, joissa kaikki alkeismagneetit ovat samansuuntaisia. Näitä alueita kutsutaan **alkeisalueiksi**, ja niiden läpimitta on noin 0,1 mm.

a) b)



Piirroksen a rautakappale ei ole ulospäin magneettinen, koska alkeisalueiden magnetoitumissuunnat osoittavat kaikkiin suuntiin. Piirroksessa b on magneettinen rautakappale.

Jo heikko ulkoinen magneettikenttä kääntää alkeisalueita ja kasvattaa kentän suuntaisten alkeisalueiden kokoa. Kun ulkoinen kenttä voimistuu, yhä useamman alkeisalueen magnetoitumissuunta on yhdensuuntainen ulkoisen magneettikentän suunnan kanssa, kunnes saavutetaan magneettinen kyllästyminen. Tällöin lähes kaikkien alkeisalueiden magnetoitumissuunnat ovat ulkoisen kentän suuntaisia.

Magnetoituminen
Rautakappale voi muuttua magneetin magneettikentässä magneettiseksi eli magnetoitua. Rauta voidaan magnetoida myös sähkövirran avulla.

Magneetilla on aina kaksi kohtiota; magneetti on dipoli. Magneetin kohtioita ei voi irrottaa toisistaan – yksikohtioista magneettia ei ole. Jos magneetti katkaistaan, saadaan kaksi magneettia, joilla kummallakin on kaksi eri kohtiota. Tämä johtuu siitä, että kappaleissa on samansuuntaisiksi kääntyneitä alkeismagneetteja. Yhdelläkin alkeismagneetilla on aina kaksi kohtiota.

Oppilastyö ▪ Magneettisuuden voimakkuus

1. Nosta pieniä rautanauloja pöydältä erilaisten magneettien avulla. Vertaa magneettien voimakkuuksia.
2. Rakenna sähkömagneetti käämistä ja rautasydämestä. Tutki sähkömagneetin voimakkuutta käämin kierrosmääriä ja sähkövirtaa vaihtamalla. Tutki, miten käämin sisälle asetettu rautasydän ja alumiinista tai puusta valmistettu sydän vaikuttavat sähkömagneetin voimakkuuteen.
3. Magnetoi sukkapuikko. Totea sukkapuikon magneettisuus kompassineulan avulla. Kuumenna sukkapuikon päätä kaasuliekillä. Vie kuumennettu pää lähelle kompassineulaa. Mitä havaitset?

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa havaittiin, että erilaisilla **magneeteilla** on **erilainen voimakkuus**; eniten rautanauloja tarttui U-magneettiin ja vähiten jääkaappimagneettiin. Oppilastyön toisessa kohdassa todetaan, että sähkömagneetin **käämin magneettisuus** on sitä **voimakkaampi**, mitä suurempi on siinä kulkeva **sähkövirta** ja mitä enemmän käämissä on **kierroksia**. Moniin tarkoituksiin tarvitaankin magneetteja, joiden voimakkuutta voidaan säätää: tällöin käytetään sähkömagneettia. Käämin sisälle asetettu **rautasydän** lisää käämin magneettisuuden voimakkuutta. Alumiini- ja puusauva eivät vaikuta magneettisuuden voimakkuuteen.

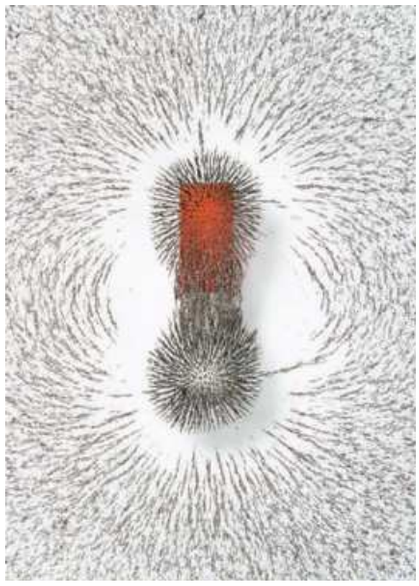
Aineen magneettisuus voidaan poistaa esimerkiksi kuumentamalla. Kun aineen lämpötila ylittää tietyn rajan, aineen alkeismagneetit asettuvat satunnaisiin suuntiin ja aine menettää magneettisuutensa. Raudan magneettisuus häviää 770 °C:n lämpötilassa. Oppilastyössä sukkapuikko menetti magneettisuuttaan kuumentamisen seurauksena.

Magneettikenttä

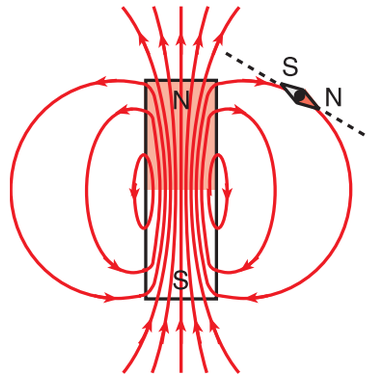
Oppilastyö ▪ Magneettikenttä

1. Aseta kompassineula herkästi kiertymään pääsevälle alustalle. Tuo tankomagneetti lähelle kompassineulaa. Liikuttele magneettia ja tarkkaile neulan asentoa.
2. Aseta kompassineula lähelle tankomagneettia. Käännä neulan asentoa ja tarkkaile neulan palautumista alkuperäiseen asemaansa. Toista koe vaihdellen etäisyyttä magneettiin.
3. Aseta tankomagneetin päälle lasilevy. Ripottele levylle rautajauhetta. Mitä havaitset? Käytä myös erimuotoisia magneetteja.
4. Kääntele kompassineulaa, joka pääsee kääntymään vapaasti pystysuunnassa. Mitä havaitset?

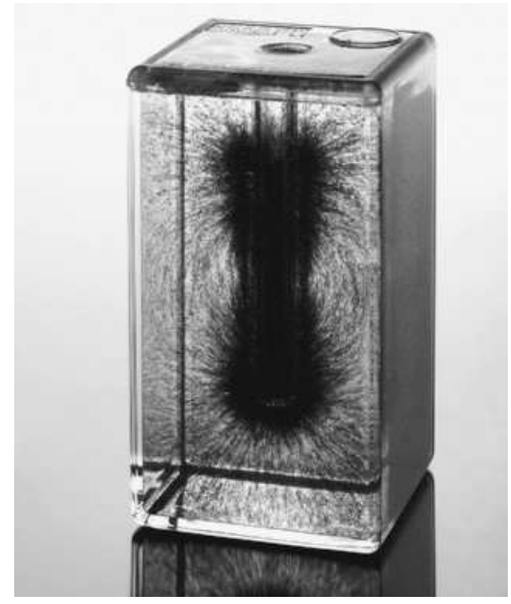
Magneetin vaikutusta kuvataan **magneettikentän** avulla. Jokaisen magneetin ympärillä on kolmiulotteinen magneettikenttä. Magneettikentässä oleva toinen magneetti tai esimerkiksi virtajohdin kokee magneettisen vuorovaikutuksen.



Magneettikenttä on joka puolella sauvamagneettia.



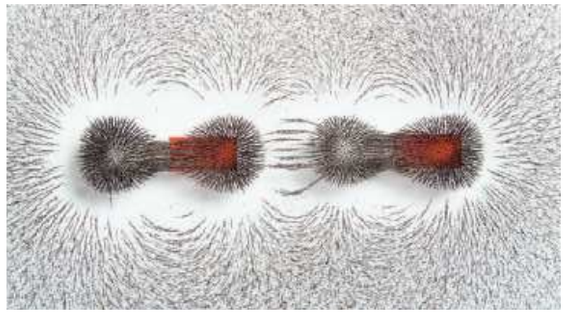
Kompassineula asettuu ulkoisen magneettikentän suuntaiseksi.

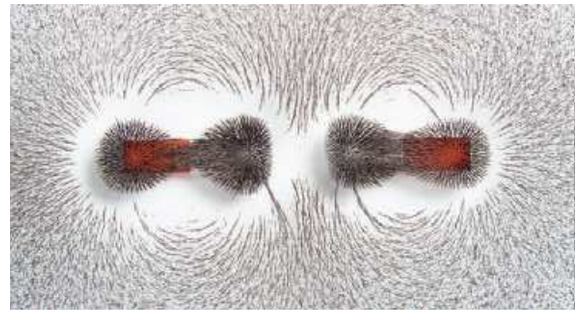


Magneettikenttä on kolmiulotteinen.

Oppilastyössä magneettikentän suunta tietyssä pisteessä saatiin selville, kun kompassineula vietiin tähän pisteeseen. **Kompassineula** on pieni kestomagneetti, joka **asettuu ulkoisen magneettikentän suuntaiseksi**. Magneettikentän **suunta** on kompassineulan **pohjoiskohtion osoittama suunta**.

Magneettikenttää kuvataan **kenttäviivoilla**. Kenttäviivat ilmaisevat magneettisen voiman suunnan kussakin pisteessä. Kun oppilastyön kohdassa 3 rautajauhetta ripoteltiin tankomagneetin läheisyyteen, rautajauhehiukkaset magnetoituivat ja asettuivat ketjuina magneetin magneettikentän kenttäviivojen suuntaisesti. Magneettikentän kenttäviivat ovat sulkeutuvia käyriä, toisin kuin sähkökentän kenttäviivat, ja niitä on sekä magneetin ulko- että sisäpuolella. Mitä tiheämmässä kenttäviivat ovat, sitä suurempi magneettinen voima kentässä olevaan toiseen magneettiin kohdistuu. Oppilastyössä kenttäviivat olivat lähimpänä toisiaan tankomagneetin päissä, joissa magneettikenttä on voimakkain. Oppilastyössä todettiin myös, että magneettikentän muoto riippuu magneetin muodosta.





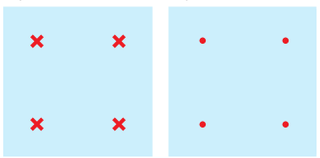
Erilaisia magneettikenttiä.

Kompassineulan pohjoiskohtio ei osoita aivan karttapohjoiseen: sen lähellä on Maan magneettinen eteläkohtio.

Oppilastyön kohdassa 4 todetaan, että maapallon ympärillä on magneettikenttä, johon kompassineula reagoi (ks. sivu 18). Kompassineula asettuu Maan pinnalla pohjois-eteläsuuntaan, pystysuunnassa kiertymään pääsevä kompassineula kiertyy vaakatasoon nähden ja asettuu Suomessa noin 70 asteen kulmaan vaakatasosta. Tätä kulmaa nimitetään inklinaatioksi.

Magneettikenttä on **homogeeninen**, jos kentän suunta ja voimakkuus ovat kaikkialla samat. Pienellä alueella maapallon magneettikenttää voidaan pitää homogeenisena.

a) b)

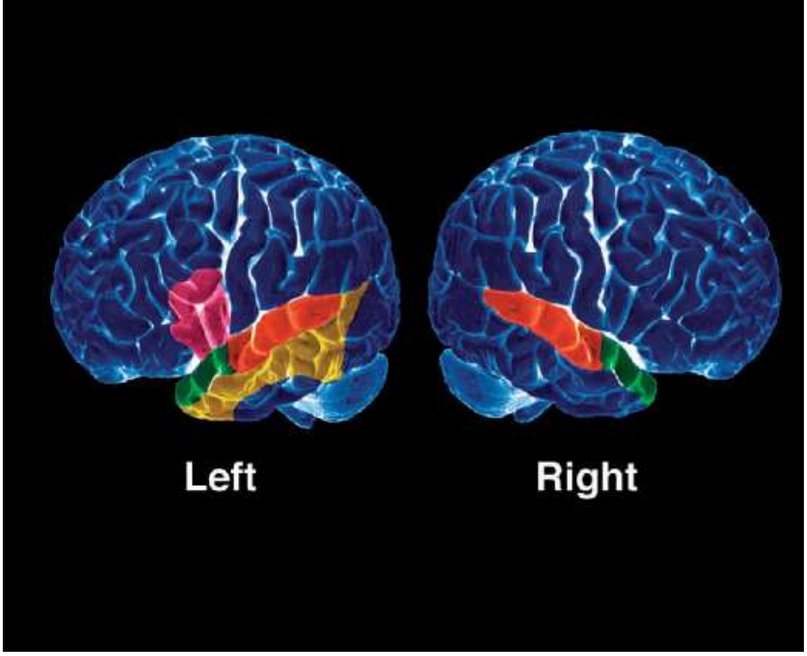


Magneettikentän suunta on kuvassa a poispäin katsojasta ja kuvassa b katsojaan päin.

Silloin, kun magneettikentän kenttäviivat ovat kohtisuorassa paperin tasoa vastaan ja poispäin katsojasta, kenttäviivoja kuvataan **rasteilla** (”nuolen pyrstö”). Jos kenttäviivojen suunta on katsojaan päin, käytetään **pisteitä** (”nuolen kärki”).

Magneettikentän voimakkuutta kuvaava suure on **magneettivuon tiheys** $\overline{B}$. Mitä tiheämmässä magneettikentän kenttäviivat ovat, sitä suurempi on magneettivuon tiheys. Magneettivuon tiheyden suunta on sama kuin magneettikentän kenttäviivan tangentin suunta.

Magneettivuon tiheyden yksikkö SI-järjestelmässä on $[B] = 1$ T (tesla). *Nikola Tesla* (1856–1943) oli kroatialais-amerikkalainen fyysikko.



Aivojen magneettikuvausta. Laitteen herkät suprajohtavat anturit tunnistavat aivojen sähköisestä toiminnasta johtuvat heikot magneettikentät. Aivokuvassa näkyy aktivoitunut kielellisen toiminnan alue, kun potilas tunnistaa tutun kielen.

Maan magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 20 μT – 60 μT, kestomagneeteilla magneettivuon tiheyden suuruus on 0,1 mT – 10 mT, sähkömagneeteilla 1 T – 3 T ja ns. supermagneeteilla se voi olla jopa 15 T.

Magneettikenttä

Magneetin vaikutusta kuvaa magneettikenttä, joka voidaan esittää kenttäviivojen avulla.

Kenttäviivat ovat suljettuja käyriä. Niiden suunta on magneetin ulkopuolella pohjoiskohtiosta (N) eteläkohtioon (S) ja magneetin sisäpuolella S-kohtiosta N-kohtioon.

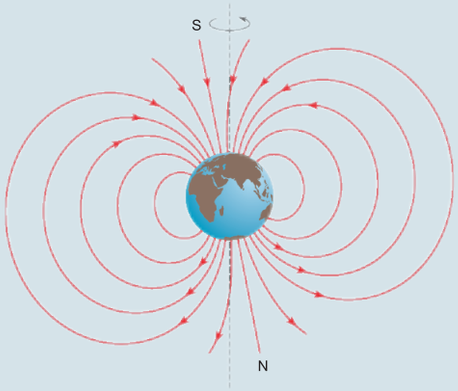
Magneettikenttä on homogeeninen, jos kentän suunta ja voimakkuus ovat kaikkialla samat.

Magneettivuon tiheys $\overline{B}$ kuvaa magneettikentän voimakkuutta ja ilmoittaa magneettikentän suunnan.

Maan magneettikenttä

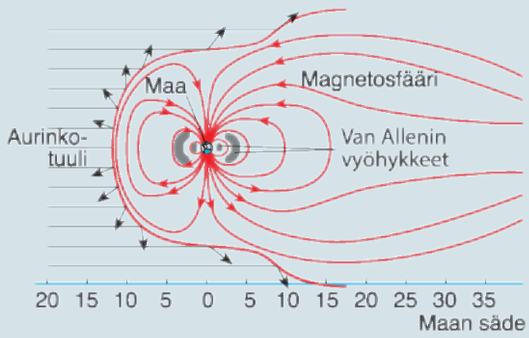
Maapallolla on magneettikenttä. Maapallon ytimen uloimpaan, nestemäiseen osaan syntyy pyörimisen ja coriolisvoimien sekä kuuman kiinteän ytimen vaikutuksesta sähkövirtoja, jotka saavat aikaan magneettikentän.

Maan magneettikentän etelänapa on Pohjois-Kanadassa ja pohjoisnapa Etelämantereella. Magneettikentän navat eivät yhdy maantieteelliseen pohjois- ja etelänapaan. Maapallon magneettikenttä on Maan pyörimisakseliin nähden noin 11° kallellaan. Esimerkiksi Suomessa kompassineula ei osoita aivan karttapohjoiseen vaan maapallon magneettiselle etelänavalle.



Deklinaatio on magneettineulan poikkeama maantieteellisestä pohjoissuunnasta. **Inklinaatio** taas on magneettineulan kallistuma vaakatasosta. Vapaasti liikkuvan magneettineulan pohjoiskohtio osoittaa Suomessa vinosti maapallon sisään. Helsingissä Maan magneettikentän magneettivuon tiheys on noin 50 μT. Deklinaatio on 4° itään ja inklinaatio 73°.

Maapallon magneettikenttä ja samoin myös deklinaatio ja inklinaatio muuttuvat hitaasti. Maan magneettikentän vuorokautiset vaihtelut johtuvat ilmakehän yläkerroksen, ionosfäärin, sähkövirroista. Myös Auringossa tapahtuvien purkausten aiheuttamat häiriöt muuttavat lyhytaikaisesti Maan magneettikenttää. Tämän muutoksen ja Maan sisäosien liikkeen vuoksi Maan magneettiset navat liikkuvat keskimääräisen sijaintinsa ympärillä. Nykyisen käsityksen mukaan Maan magneettikentän napaisuus on vaihtunut lukuisia kertoja vuosimiljardien kuluessa. Tällä hetkellä pohjoisen pallonpuoliskon magneettinen napa liikkuu nopeammin kuin koskaan viimeisen sadan vuoden aikana: viime vuosina se on liikkunut noin 40 km vuodessa luoteeseen. Arvellaan, että maapallon magneettikenttä on vaihtamassa napaisuuttaan. Napaisuuden vaihdon arvellaan kestävän tuhansia vuosia.



Maan magneettikenttä ulottuu kauas avaruuteen. Sen ionosfäärin yläpuolista aluetta nimitetään magnetosfääriksi. Auringon säteilypaine painaa magnetosfäärin pisaran muotoiseksi. Magnetosfäärin ulomman reunan etäisyys Maasta on noin 40 Maan sädettä. Magneettikenttä suojaa maapalloa kosmiselta hiukkassäteilyltä ja Auringosta tulevilta hiukkasilta, mm. protoneilta ja elektroneilta, kääntämällä näiden hiukkasten liikesuunnan. Hiukkasmyrskyt muuttavat Maan magneettikenttää, ja muutokset synnyttävät (indusoivat) sähkövirtoja esimerkiksi suurjännitejohtoihin ja voivat aiheuttaa ylikuormituksesta johtuvia sähkökatkoksia. Magneettiset myrskyt häiritsevät tietoliikenneyhteyksiä.

Aine magneettikentässä

Oppilastyö ▪ Ferro-, dia- ja paramagneettiset aineet
Aseta pieni rautasauva riippumaan vaaka-asennossa hyvin voimakkaan U-magneetin napojen väliin. Pidä aluksi sauvaa paikallaan ja päästä sitten irti. Tarkkaile rautasauvaa. Toista koe käyttäen alumiini- ja grafiittisauvaa. Vertaa sauvojen asentoa toisiinsa.

Aineet ryhmitellään sen perusteella, miten ne muuttavat ulkoista magneettikenttää. **Aineet** ovat **ferro-, dia- tai paramagneettisia**. Oppilastyössä rautasauva tarttui voimakkaasti kiinni magneetin napoihin. Sen sijaan alumiinisauvan ja grafiittisauvan vuorovaikutus magneetin kanssa oli heikko: alumiiniin kohdistui heikko vetävä voima ja grafiittiin heikko hylkivä voima. Rauta on ferromagneettinen aine, alumiini paramagneettinen aine ja grafiitti diamagneettinen aine.

Ferromagneettinen aine

Ferromagneettiset aineet magnetoituvat voimakkaasti ja voivat olla pysyvästi magneettisia. Rauta on ferromagneettinen aine ja magnetoituvista aineista tunnetuin sekä magneettisilta ominaisuuksiltaan voimakkain. Ferromagnetismia esiintyy myös koboltissa ja nikkelissä, mutta niiden magneettiset ominaisuudet ovat heikommat kuin raudan. Monet rauta- ja nikkeliesiintymät on löydetty kokeilemalla, kuinka niistä otetut näytteet tarttuvat magneettiin.

Malmien etsinnässä voidaan hyödyntää aineiden magneettisia ominaisuuksia. Kuvassa valkoiset juovat ovat magnetiittia (Fe_3O_4) ja harmaat juovat kalsiittia. Puhdas magnetiitti sisältää yli 70 % rautaa ja on siksi voimakkaasti magneettinen.

Permeabiliteetti on aineen magneettista käyttäytymistä kuvaava suure. Se ilmaisee, miten aine vaikuttaa magneettikenttään. Permeabiliteetti esitetään tavallisesti aineelle ominaisen **suhteellisen permeabiliteetin** ja **tyhjiön permeabiliteetin** avulla.

Aine	μ_r
kupari	0,999999
vesi	0,999991
happi	1,000002
alumiini	1,000021
platina	1,000279
meltorauta, max	20 000
lejeerinki Si 50 %, Fe 50 % max	40 000

Useimmille aineille $\mu_r \approx 1$.

Suhteellinen permeabiliteetti
Suhteellinen permeabiliteetti μ_r on

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

jossa μ on permeabiliteetti ja μ_0 tyhjiön permeabiliteetti: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am).

$\mu_r \gg 1$

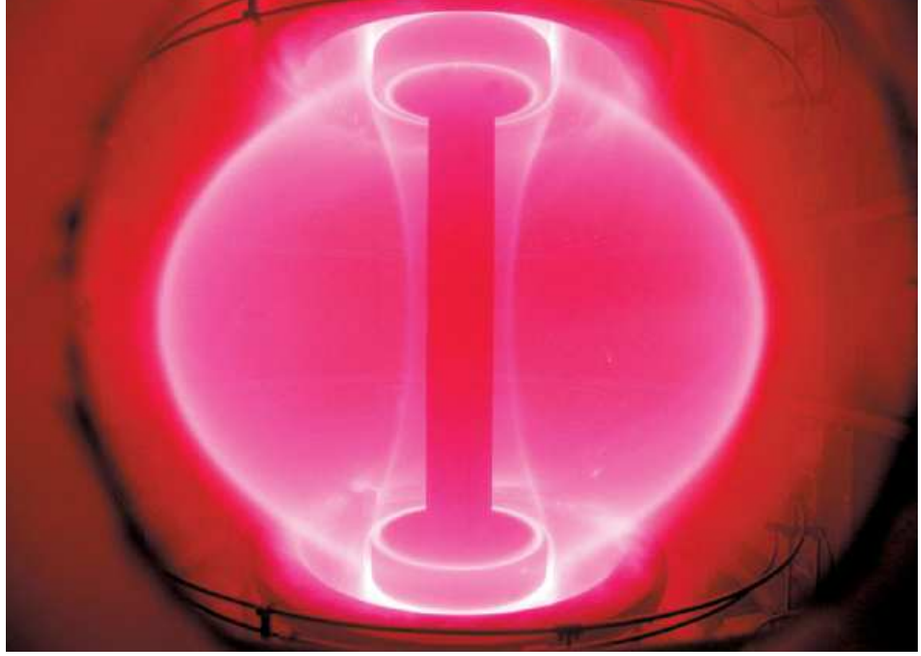
Ferromagneettinen aine vahvistaa voimakkaasti ulkoista magneettikenttää.

Ferromagneettisen aineen suhteellinen permeabiliteetti on paljon suurempi kuin yksi. Tämä tarkoittaa, että ferromagneettinen aine vahvistaa voimakkaasti ulkoista magneettikenttää. Suhteellinen permeabiliteetti riippuu magnetoivan kentän voimakkuudesta eikä siis ole vakio.

Ferromagneettinen aine sisältää alkeismagneettien muodostamia alkeisalueita (ks. s. 12), jotka voivat kääntyä ulkoisen kentän suuntaisiksi. Eräiden ferromagneettisten aineiden alkeisalueiden magnetoitumissuunnat muuttuvat helposti. Tällaiset aineet ovat herkästi magnetoituvia, mutta niiden magneettisuus myös häviää nopeasti, kun ulkoinen magneettikenttä poistuu ja alkeisalueiden suunnat sekoittuvat uudelleen. Näin käyttäytyviä aineita kutsutaan **magneettisesti pehmeiksi aineiksi**. Monissa laitteissa, kuten sähkölukoissa ja erilaisissa releissä, sähkömagneettien sydämet on tehty magneettisesti pehmeistä aineista. Sähkömagneetissa sydäntä ympäröivään käämiin kytketään sähkövirta, jonka synnyttämä magneettikenttä magnetoi sydämen. Kun virta katkaistaan, magneettisuus häviää. Suuria sähkömagneetteja on esimerkiksi tehtaissa rautakappaleiden nostolaitteissa. Myös tietokoneiden kiintolevyjen lukupäät on tehty magneettisesti pehmeistä aineista.

Kaiutin avattuna.

Magneettisesti kovien aineiden alkeisalueiden magnetoitumissuunnat säilyvät, ja ulkoisen kentän hävittyä aineet jäävät magneettisiksi. Sitä magnetismia, joka jää jäljelle, sanotaan **jäännösmagnetismiksi**. Kestomagneetin magnetismi on jäännösmagnetismia. Magneettisesti kovan aineen magneettisuuden poistami-



Plasma on ionisoitunutta ainetta. Fuusioreaktoreissa plasmaa ohjaillaan magneettikentillä. Sopivan muotoisilla magneettikentillä plasma saadaan vangittua ns. magneettisiin pulloihin, jolloin plasma ei törmää reaktorin seinämiin. Kuvassa pinkki alue on kuumaa plasmaa.

seen tarvitaan voimakas vastakkaissuuntainen magneettikenttä. Magneettisesti kovista aineista saadaan hyviä kestomagneetteja. Magneettisesti kovia aineita käytetään mm. magneettisissa muisteissa. Pienet ulkoiset magneettikentät eivät pysty muuttamaan muisteja.

Magneettisesti pehmeä ja magneettisesti kova aine
Magneettisesti pehmeät aineet ovat helposti magnetoituvia, mutta niiden magneettisuus häviää helposti.
Magneettisesti kovien aineiden alkeisalueiden magnetoitumissuunnat säilyvät, ja ulkoisen kentän hävittyä aineet jäävät magneettisiksi.

Ferromagneettinen aine menettää magneettisuutensa sille ominaisessa lämpötilassa, **Curie-lämpötilassa**. Raudan Curie-lämpötila on 770 °C.

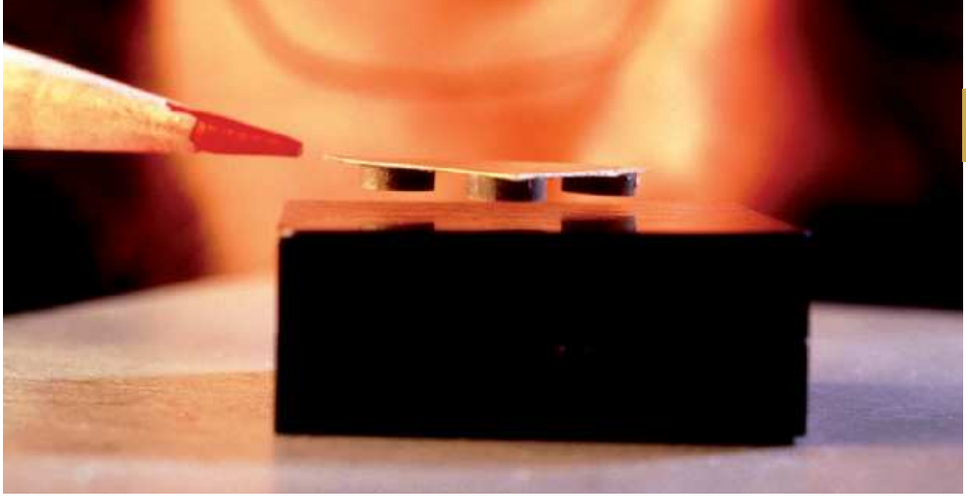
Para- ja diamagneettinen aine

$\mu_r \geq 1$

Paramagneettinen aine vahvistaa vähän ulkoista magneettikenttää.

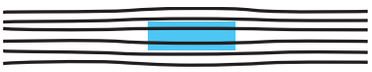
Paramagneettinen aine on atomitasolla pysyvästi magneettinen ja vahvistaa vähän ulkoista magneettikenttää. Atomeissa ja molekyyleissä elektronit pyrkivät liikkumaan siten, että niiden aiheuttamat alkeismagneetit kumoavat toisensa. Paramagneettisessa aineessa tämä kumoutuminen ei ole täydellistä. Ulkoisessa magneettikentässä kumoutumatta jääneet atomaariset magneettikentät pyr-

Nestemäinen happi tarttuu voimakkaan supermagneetin napoihin, koska happi on paramagneettinen aine. Ilmiö voidaan havaita vain voimakkaan magneetin avulla, koska paramagneettisten aineiden magneettisuus on hyvin heikkoa.



Kuvassa kolme nappimagneettia leijuu voimakkaan magneetin päällä.

kivät kiertymään ulkoisen magneettikentän suuntaisiksi, jolloin ulkoinen magneettikenttä hieman vahvistuu. Paramagneettisten aineiden suhteellinen permeabiliteetti on siten hieman suurempi kuin yksi. Kun ulkoinen kenttä poistetaan, atomaaristen magneettien järjestys häviää tai vähenee lämpöliikkeen vaikutuksesta. Paramagneettisia aineita ovat esimerkiksi alumiini, platina ja happi. Paramagneettiset aineet ovat äärimmäisen heikosti magneettisia ferromagneettisiin aineisiin verrattuna.



$\mu_r \leq 1$

Diamagneettinen aine heikentää ulkoista magneettikenttää.

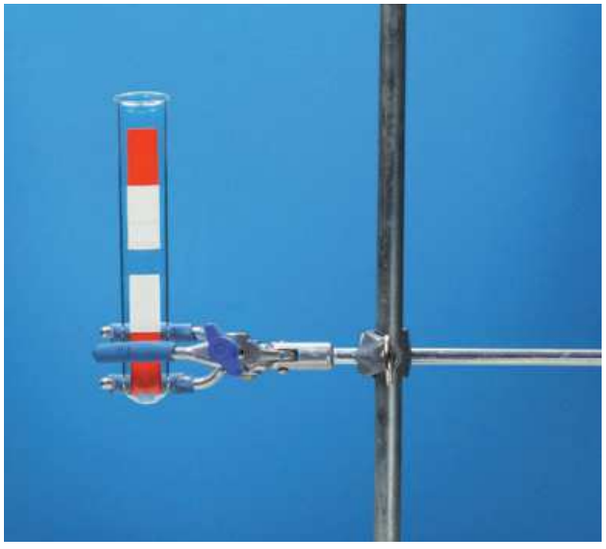
Diamagneettinen aine magnetoituu vasta ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. Diamagneettinen aine käyttäytyy ulkoisessa magneettikentässä päinvastoin kuin para- ja ferromagneettiset aineet. Ulkoinen magneettikenttä aiheuttaa atomien elektronien rataliikkeeseen muutoksen, jonka vaikutus Lenzin lain mukaisesti (ks. s. 58) vastustaa ulkoista magneettikenttää. Diamagneettisen aineen suhteellinen permeabiliteetti on siten pienempi kuin yksi. Yleensä diamagneettisten aineiden vaikutus ulkoiseen magneettikenttään on pieni eli ne ovat heikosti magneettisia (poikkeuksena ovat ns. suprajohteet). Diamagneettisia aineita ovat esimerkiksi grafiitti, kupari, vesi ja ruokasuola. Diamagnetismia esiintyy kaikilla materiaaleilla, kun ulkoinen magneettikenttä vaikuttaa materiaaliin. Myös ferromagneettisilla aineilla esiintyy diamagnetismia, mutta se on useita kertaluokkia heikompi ilmiö kuin ferromagnetismi. Diamagneettinen aine pyrkii hylkimään ulkoista magneettikenttää. Näin ollen myös alumiinilla voi olla sekä para- että diamagneettisia ominaisuuksia (vaikka alumiini on siis paramagneettinen aine).

Pohdi ja etsi

1-1. a) Pohdi kompassin merkitystä löytöretkien kannalta.
b) Tarttuuko magneetti muihinkin metalleihin kuin rautaan?
c) Mitä malmeja voisi löytää magneetin avulla?

1-2. Kuvassa on vanha kiinalainen lusikkakompassi (noin 200 eKr.). Selvitä sen toimintaperiaate.

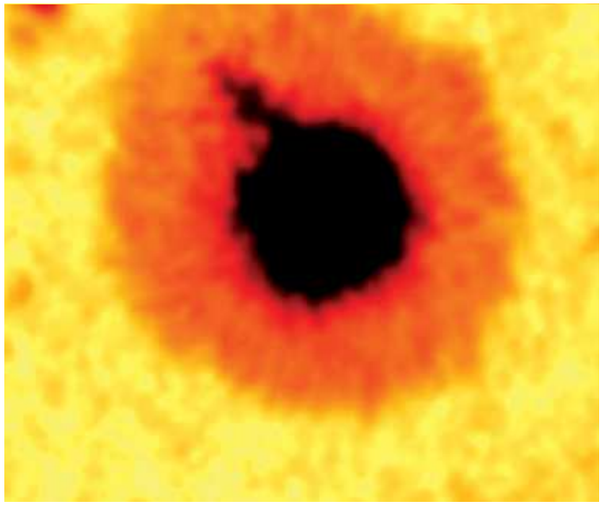
1-3. a) Miksi toinen kuvan magneeteista näyttää leijuvan ilmassa?
b) Miten selvität, kumpi kestomagneetin (tai kompassineulan) pää on pohjoiskohtio?



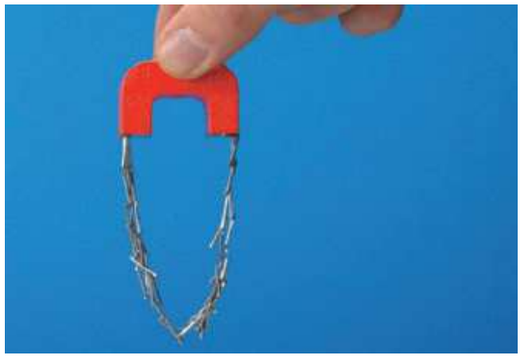
1-4. a) Rautanaula voidaan magnetoida tasavirtalähteeseen kytketyn käämin magneettikentän avulla. Miten naulan magneettisuus voidaan poistaa?
b) Miten kestomagneetin magneettisuuden voisi poistaa?

1-5. Voimakkaita sähkömagneetteja käytetään nostureissa mm. teollisuuslaitoksissa. Millaisia rajoituksia tällaisen nosturin toimintaan liittyy?

1-6. a) Selvitä, mitä auringonpilkut ovat.
b) Mitä ovat magneettiset myrskyt, ja mitä vaikutuksia niillä on?



1-7. Miksi kuvan rautanaulajono kaartuu?



1-8. Selvitä, mikä on magnetometri ja mihin sitä käytetään.

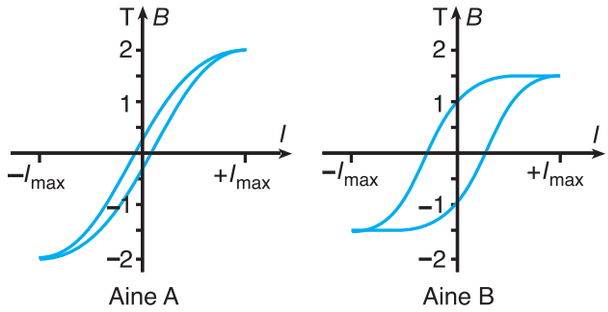
1-9. a) Miksi vaihtovirtatekniikassa käytettävissä muuntajissa käytetään magneettisesti pehmeitä aineita?
b) Missä käytetään magneettisesti kovia aineita?

1-10. a) Mitä tarkoittavat käsitteet deklinaatio ja inklinaatio? Selvitä niiden arvot asuinpaikkakunnallasi. Miten deklinaatio otetaan huomioon merellä veneiltäessä?
b) Miksi kompasseja valmistetaan kahta eri tyyppiä: pohjoiselle pallonpuoliskolle ja eteläiselle pallonpuoliskolle sopivia?

1-11. a) Hahmottele kenttäviivaesitys kuvaamaan 1) kahden pistevarauksen sähkökenttää 2) kahden sauvamagneetin magneettikenttää.
b) Suunnittele koejärjestelyt, joiden avulla voit tutkia, miten kultasormus ja rautarengas vaikuttavat 1) sähkökentän 2) magneettikentän muotoon.

1-12. a) Kuinka ferromagneettinen, paramagneettinen ja diamagneettinen aine vaikuttavat magneettikenttään?
b) Kuinka magneetti vaikuttaa kohdassa a mainittuihin aineisiin?

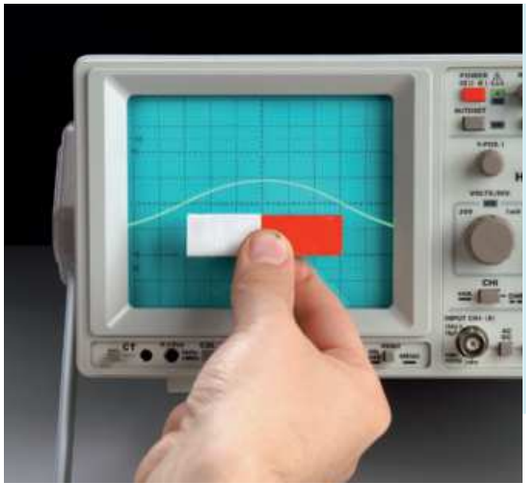
1-13. Hystereesiskäyrä kuvaa käämin sisään asetetun tangon, esimerkiksi rautatangon, magneettivuon tiheyden muuttumista, kun käämin magneettikenttä (tyhjiössä) muuttuu. Hystereesiskäyrän yhden silmukan fysikaalinen pinta-ala kertoo energiamäärän, joka aineessa tilavuusyksikköä kohti muuntuu aineen sisäenergiaksi aiheuttaen aineen lämpenemistä. Magneettisesti kovan aineen hystereesiskäyrä on leveä ja magneettisesti pehmeän aineen kapea.
Ferromagneettisista aineista A ja B tehdyt sauvat asetettiin vuorotellen saman käämin sisään. Kun käämin virtaa muutettiin jaksollisesti positiivisen ja negatiivisen maksimiarvon välillä, vaihteli aineen magneettivuon tiheyden suuruus oheisten kuvioiden mukaisesti. Kumpi aineista soveltuu
1) sähkömagneetin sydänaineeksi
2) kestomagneetiksi
3) muuntajan sydänaineeksi?



1-14. a) Selvitä, mitä tarkoitetaan suprajohtavalla aineella ja suprajohtaviin aineisiin liittyvällä Meissner-ilmiöllä.
b) Magneettikuvauslaitteissa on hyvin voimakas magneettikenttä. Laitteessa on käämi, jonka johdin on suprajohtavaa materiaalia. Mitä hyötyä on suprajohteen käytöstä? Kuinka voimakas magneettikenttä on kyseessä?

1.2 Liikkuva varattu hiukkanen magneettikentässä

Magneettinen voima



Oppilastyö ▪ Magneetin vaikutus varattuun hiukkaseen

1. Varaa eboniittisauva hankaamalla sitä turkiksella. Aseta sauva herkästi pyörimään pääsevälle alustalle. Vie kestomagneetti paikallaan olevan varatun sauvan lähelle. Mitä havaitset?

2. Vie kestomagneetti oskilloskoopin kuvaputken lähelle. Tutki, miten magneetti vaikuttaa kuvaputken pintaan osuvaan elektronisuihkuun. Toista koe käyttäen vahvuudeltaan erilaisia magneetteja.

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa magneetti ei kohdista voimavaikutusta paikallaan olevaan varattuun eboniittisauvaan. Oppilastyön toisessa kohdassa todetaan, että magneetti vaikuttaa suihkun **liikkuviin** elektroneihin, joiden suunta muuttuu. Suunnanmuutos on sitä suurempi, mitä voimakkaampi magneetti on. Magneetin kääntäminen muuttaa elektronien suunnanmuutoksen vastakkaiseksi. Oppilastyön perusteella magneettikentässä liikkuviin elektroneihin kohdistuu voimavaikutus.

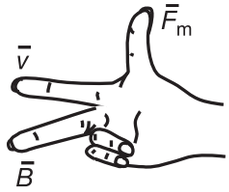
Liikkuvalla varatulla hiukkasella, kuten elektronilla, on sähkökentän lisäksi magneettikenttä. Magneetti ja liikkuvat elektronit ovat keskenään vuorovaikutuksessa kenttiensä välityksellä. **Magnetismi on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen toinen ilmenemismuoto**.

Liikkuvaan varattuun hiukkaseen kohdistuva magneettinen voima

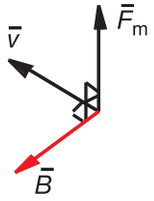
Jos varattu hiukkanen liikkuu kohtisuoraan magneettikenttää vastaan, hiukkaseen kohdistuu magneettinen voima $\overline{F}_\mathrm{m}$, jonka suuruus saadaan yhtälöstä

$$F_\mathrm{m} = qvB,$$

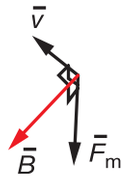
jossa q on hiukkasen varauksen itseisarvo, v hiukkasen nopeus ja B magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus. Tällöin magneettinen voima on kohtisuorassa hiukkasen nopeutta ja magneettikenttää vastaan.



Oikean käden sääntö.

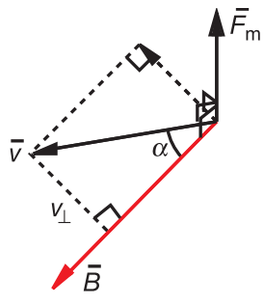


Positiivisesti varattu hiukkanen, $\bar{F}_m \perp \bar{v} \perp \bar{B}$.



Negatiivisesti varattu hiukkanen, $\bar{F}_m \perp \bar{v} \perp \bar{B}$.

Magneettisen voiman yhtälöön sijoitetaan sähkövarauksen itseisarvo ja voiman suunta päätellään erikseen. Magneettikentässä olevaan **positiivisesti** varattuun hiukkaseen vaikuttavan magneettisen voiman suunta saadaan **oikean käden säännön** avulla. Peukalo osoittaa voiman suunnan. Etusormi osoittaa positiivisesti varatun hiukkasen liikkeen suunnan. Keskisormi osoittaa magneettivuon tiheyden suunnan. Negatiivisesti varatulle hiukkaselle peukalon suunta on vastakkainen.



$F_m = qv_\perp B = qvB\sin\alpha$

Jos varatun hiukkasen nopeuden ja magneettivuon tiheyden (myös magneettikentän suunnan) välinen **kulma ei ole suora**, magneettista voimaa laskettaessa on käytettävä **nopeuden** magneettikenttää vastaan **kohtisuoraa komponenttia** (tai magneettikentän nopeutta vastaan kohtisuoraa komponenttia).

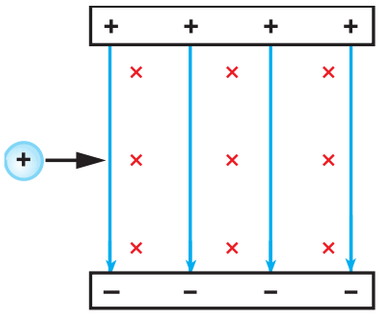
Vinosti magneettikenttään nähden liikkuvaan varattuun hiukkaseen kohdistuvan magneettisen voiman $\bar{F}_m$ suuruus on

$$F_m = qv_\perp B = qvB\sin\alpha,$$

jossa kulma α on magneettivuon tiheyden $\bar{B}$ ja hiukkasen nopeuden $\bar{v}$ välinen kulma. Jos kulma α on 90°, magneettinen voima on kohtisuorassa hiukkasen nopeutta ja magneettikenttää vastaan: tällöin $F_m = qvB$.

Varattuun hiukkaseen kohdistuu magneettinen voima vain, jos hiukkanen liikkuu ja jos hiukkasen liikkeen suunta poikkeaa magneettikentän suunnasta. Jos varattu hiukkanen liikkuu magneettikentässä kentän suuntaisesti (kulma $\alpha = 0°$), magneettinen voima on nolla. Muulloin magneettinen voima pyrkii kääntämään hiukkasen liikesuuntaa.

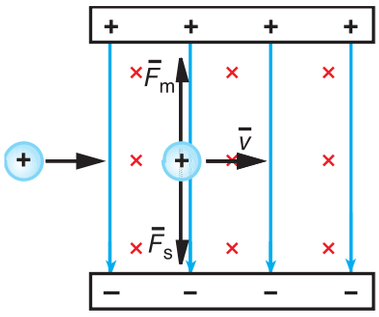
Esimerkki 1



Positiivisesti varattu hiukkanen saapuu kohtisuorasti homogeenisen magneettikentän kenttäviivoja vastaan nopeudella 2,2 Mm/s. Magneettivuon tiheyden suuruus on 150 mT. Sähkökenttä on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. Laske sähkökentän voimakkuus, jotta hiukkanen kulkisi suoraviivaisesti kenttien läpi.

$v = 2{,}2$ Mm/s, $\quad B = 150$ mT

Kertaa sähkökenttä Fysiikka 6 -kirjan sivulta 88.

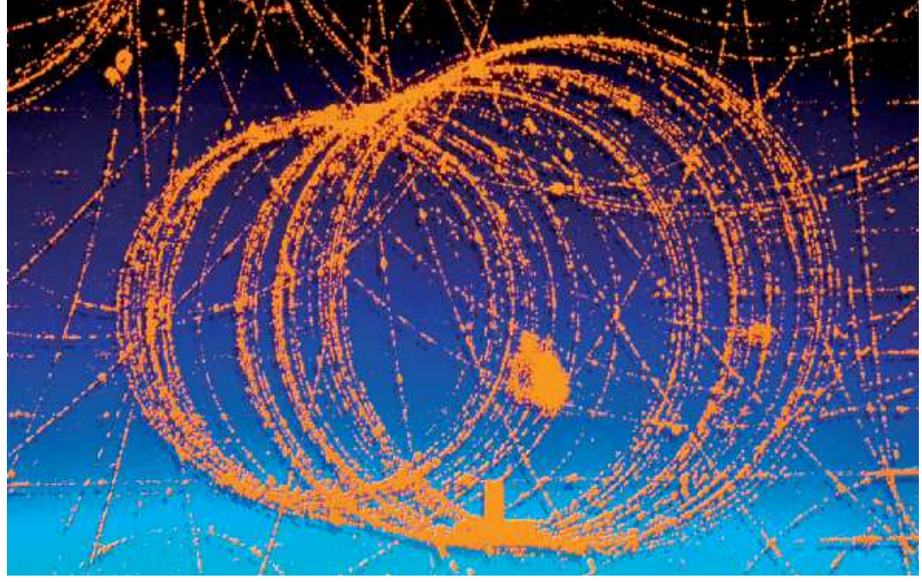


Sähkökenttä on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. Liikkuvaan varattuun hiukkaseen kohdistuvan sähköisen voiman suuruus on $F_s = qE$ ja magneettisen voiman suuruus $F_m = qvB$. Positiivisesti varattuun hiukkaseen kohdistuva sähköinen voima on kuvassa alas. Oikean käden säännön perusteella magneettisen voiman suunta on kuvassa ylös. Jotta hiukkanen kulkisi suoraan kentän läpi, Newtonin II lain mukaan liikettä vastaan kohtisuorassa suunnassa on oltava $\sum \vec{F} = \vec{0}$ eli $\vec{F}_m + \vec{F}_s = \vec{0}$. Valitaan suunta ylös eli magneettisen voiman suunta positiiviseksi, jolloin saadaan skalaariyhtälö $F_m - F_s = 0$. Yhtälöstä $F_s = F_m$ eli $qE = qvB$ saadaan

$$E = vB = 2{,}2 \text{ Mm/s} \cdot 150 \text{ mT} = 0{,}33 \text{ MV/m}.$$

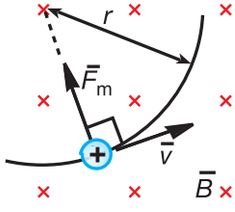
Sähkökentän voimakkuus on 0,33 MV/m, suunta piirroksessa alas.

Huomaa, että varatun hiukkasen liikkeen rata on esimerkissä tarkastellun mukainen vain, kun hiukkasen oletetaan liikkuvan tyhjiössä. Vuorovaikutuksia muiden hiukkasten kanssa ei ole.



Positronin eli elektronin antihiukkasen ympyräratoja magneettikentässä. Liikkuvan varatun hiukkasen liikesuuntaa voidaan ohjata sekä sähkö- että magneettikentällä. Magneettikentällä ohjaamisessa on kuitenkin se etu, että hiukkasen ratavauhti ei muutu ja siksi hiukkasen energia pysyy vakiona.

Varatun hiukkasen rata magneettikentässä



Kun varattu hiukkanen liikkuu tyhjiössä vakiovauhdilla homogeenisessa magneettikentässä kohtisuorasti kenttäviivoja vastaan, hiukkaseen kohdistuu magneettinen voima $\bar{F}_m$. Voima on kohtisuorassa hiukkasen nopeusvektoria vastaan ja saa hiukkasen liikkumaan ympyrärataa pitkin. Magneettikenttä muuttaa varatun hiukkasen nopeuden suuntaa, ei sen suuruutta. Hiukkasen liikeyhtälö on $\sum \bar{F} = m\bar{a}_n$. Koska hiukkaseen kohdistuva paino on häviävän pieni magneettiseen voimaan verrattuna, painoa ei oteta huomioon. Kun suunta kohti radan keskipistettä on positiivinen, skalaariyhtälöstä $qvB = m\frac{v^2}{r}$ saadaan varatun hiukkasen ympyräradan säteeksi magneettikentässä $r = \frac{mv}{qB}$, jossa m on hiukkasen massa, v sen nopeus, q varaus ja B magneettivuon tiheyden suuruus.

$\omega = 2\pi f$ ja

$f = \frac{1}{T}$

Koska magneettikentässä liikkuvan varatun hiukkasen kulmanopeus on $\omega = \frac{v}{r} = \frac{v}{\frac{mv}{qB}} = \frac{qB}{m}$, kulmanopeus ja hiukkasen kierrosaika ovat riippumattomia hiukkasen nopeudesta ja radan säteestä magneettikentässä.

Esimerkki 2

Maan magneettikenttään tulee ionosfäärin ulkoreunassa kosmisen säteilyn protoneja nopeudella 6,5 Mm/s kohtisuorasti kenttäviivoja vastaan. Maan magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus tällä alueella on 0,11 μT.
a) Laske protonien radan säde magneettikentässä.
b) Miten Maan magneettikenttä suojaa maapalloa avaruudesta tulevalta säteilyltä?

$v = 6{,}5\ \text{Mm/s}, \quad B = 0{,}11\ \mu\text{T}, \quad m = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg},$
$q = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

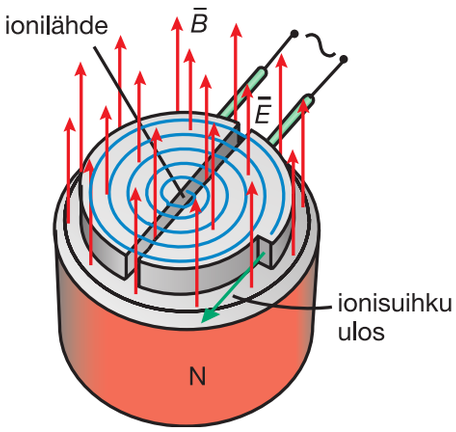
a) Koska protonit tulevat kohtisuorasti magneettikentän kenttäviivoja vastaan, protoniin kohdistuva magneettinen voima on kohtisuorassa protonin nopeutta vastaan. Näin ollen protonit joutuvat tasaiseen ympyräliikkeeseen. Protonien liikeyhtälö on $\sum \vec{F} = m\vec{a}_\text{n}$. Kun suunta kohti radan keskipistettä on positiivinen, skalaariyhtälöstä $qvB = \dfrac{mv^2}{r}$ saadaan ympyäradan säteeksi

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 6{,}5\ \text{Mm/s}}{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 0{,}11\ \mu\text{T}} \approx 6{,}2 \cdot 10^{5}\ \text{m}.$$

Protonien radan säde magneettikentässä on 620 km.

b) Maan magneettikenttä muuttaa avaruudesta tulevien varattujen hiukkasten lentoratoja ja estää osaa niistä ohjautumasta Maata kohti. Hiukkasten ohjautuminen kaareville radoille riippuu mm. niiden tulosuunnasta (vrt. oikean käden sääntö) ja varauksen suuruudesta. Esimerkiksi Auringosta tulevat hiukkaset osuvat Maan magneettikenttään päiväntasaajan tienoilla lähes kohtisuorasti ja napojen lähellä vinosti. Tämän takia Auringon hiukkasia saapuu Maan ilmakehään huomattavasti enemmän napa-alueilla kuin muualla. Revontulet syntyvät näiden hiukkasten ja ilmakehän molekyylien välisten törmäyksien seurauksena, ja ne näkyvät voimakkaimpina lähellä Maan magneettisia napoja.

Syklotroni

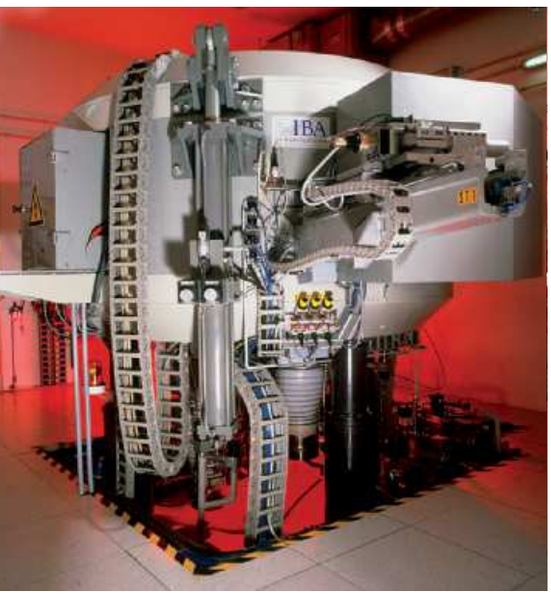


Huomaa, että piirroksesta on poistettu syklotronin ylempi magneetti.

Syklotroni on hiukkaskiihdytin. Syklotronissa varattuja hiukkasia kiihdytetään tyhjiössä sähkökentän avulla suureen nopeuteen ja ohjataan magneettikentän avulla takaisin uudelleen kiihdytettäviksi. Syklotronia käytetään hiukkasfysiikan ja ydinfysiikan tutkimuksissa ja sovelluksissa, kuten lääketieteellisissä hoidoissa käytettävien radioaktiivisten hoitoaineiden valmistuksessa.

Syklotronissa on kaksi puoliavointa D-kirjaimen muotoista elektrodia sähkömagneetin napojen välissä. D-kappaleiden välillä on suuritaajuinen vaihtojännite, joka synnyttää D-kappaleiden väliin jaksollisesti suuntaansa vaihtavan sähkökentän. Sähkökenttä toimii varattuja hiukkasten kiihdytyskenttänä. Ionit ohjataan ionilähteestä syklotronin keskelle, josta sähkökenttä kiihdyttää ionit toiseen elektrodiin. Elektrodien sisällä ei ole sähkökenttää, ja ionit kulkevat siellä magneettikentän vaikutuksesta puoliympyrän ja palaavat takaisin sähkökenttään. Ionien nopeus kasvaa elektrodien välissä. Koska sähkökentän suunta elektrodien välillä muutetaan vaihtojännitteen avulla jokaisen puolikierroksen jälkeen, sähkökenttä kiihdyttää ioneja niiden tullessa uudelleen elektrodien väliin.

Koska hiukkasen kulmanopeus on radan säteestä ja hiukkasen nopeudesta riippumatta vakio, vaihtojännitteellä on vakiotaajuus $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$: syklotronin kiihdytysjännitteen taajuus on yhtä suuri kuin ionin kierrostaajuus. Jännitteen taajuus tahdistetaan hiukkasten kierrostaajuuteen $f = \frac{1}{T}$ siten, että jännitteen suunnan pitää vaihtua samassa ajassa, joka hiukkaselta kuluu puolikkaaseen kierrokseen, ja kokonaisen kierroksen jälkeen jännitteen pitää olla samassa vaiheessa kuin alkutilanteessa. Ionin nopeuden kasvaessa myös ionin magneettikentässä kulkeman ympyräradan säde ($r = \frac{mv}{qB}$) kasvaa. Ionien rata on spiraalimainen. Ionit ohjataan lopuksi poikkeutuselektrodilla kohteeseen, ulos syklotronista.



Lääkkeiden kehitystyössä käytettävä syklotroni.

Esimerkki 3

Protoneja kiihdytetään syklotronissa jännitteellä, jonka taajuus on 8,0 MHz. Syklotronin D-elektrodien säde on 0,38 m.
a) Kuinka suuri on syklotronin magneettikentän magneettivuon tiheys?
b) Milloin protoneilla on suurin liike-energia?

$f = 8{,}0\ \text{MHz}, \quad r = 0{,}38\ \text{m}, \quad m = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg},$
$q = 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

a) Magneettisen voiman takia protonit liikkuvat syklotronissa pitkin ympyrärataa. Protonien liikeyhtälö on $\sum \overline{F} = m\overline{a}_\text{n}$. Kun suunta kohti radan keskipistettä on positiivinen, skalaariyhtälöstä $qvB = \dfrac{mv^2}{r}$ saadaan protonin nopeudelle lauseke $v = \dfrac{qBr}{m}$. Syklotronissa kiihdytettävien protonien kulmanopeus on $\omega = 2\pi f$. Koska syklotronin kiihdytysjännitteen taajuus on yhtä suuri kuin protonien kierrostaajuus, kiihdytystaajuus on $f = \dfrac{\omega}{2\pi} = \dfrac{\dfrac{v}{r}}{2\pi} = \dfrac{\dfrac{qBr}{rm}}{2\pi} = \dfrac{qB}{2\pi m}$. Magneettivuon tiheyden suuruudeksi saadaan

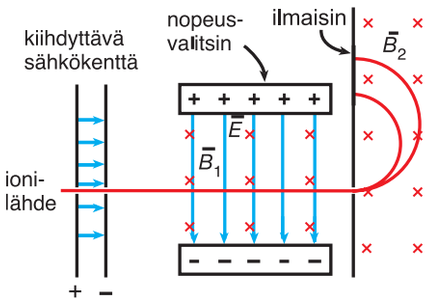
$$B = \frac{2\pi mf}{q} = \frac{2\pi \cdot 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 8{,}0\ \text{MHz}}{1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \text{C}}$$
$$\approx 0{,}52\ \text{T}.$$

Syklotronin magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 0,52 T.

b) Protonien liike-energia on suurin silloin, kun protonit kiertävät pitkin syklotronin ulointa ympyrärataa, koska silloin protonien nopeus on suurimmillaan.

Massaspektrometri

Massaspektrometria käytetään mm. ionien ominaisvarauksien sekä atomien ja molekyylien massojen määrittämisessä. Massaspektrometrilla saadaan myös erotettua toisistaan saman alkuaineen eri isotoopit ja niiden esiintymisrunsaus. Massaspektrometrin toiminta perustuu siihen, että ionien radat sähkö- ja magneettikentissä riippuvat ionien varauksesta ja massasta.



Tutkittava näyte täytyy ionisoida, sillä sähkö- ja magneettikentän avulla voidaan ohjata vain varattuja hiukkasia. Ionit ohjataan kiihdyttävään sähkökenttään, jossa ne saavat massasta ja varauksesta riippuvan nopeuden $\left(qU = \frac{1}{2}mv^2, \text{ josta } v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}\right)$. Ionit tulevat ns. nopeusvalitsimeen kohtisuorasti sen magneettikenttää ja sähkökenttää vastaan.

Liikkuvaan ioniin kohdistuvat sähköinen voima $\bar{F}_s$ ja magneettinen voima $\bar{F}_m$ ovat vastakkaissuuntaiset. Ionien rata ei kaareudu, kun ehto $F_s = F_m$ eli $qE = qvB_1$ on voimassa. Tällöin nopeudella $v = \frac{E}{B_1}$ valitsimeen tulevien ionien rata on suora; muut ionit kaareutuvat ja ohjautuvat laitteen seinämiin. Kaikilla nopeusvalitsimesta tulevilla ioneilla on sama nopeus. Sitten ionit ohjataan kohtisuorasti magneettikenttään, jossa ne kulkevat puoliympyrän muotoisia ratoja. Lopulta ionit osuvat esimerkiksi tietokoneeseen kytkettyihin ilmaisimiin. Ionien ratojen säteet $r = \frac{mv}{qB_2}$ riippuvat ionien massasta, varauksesta ja vauhdista sekä magneettivuon tiheyden suuruudesta. Kaikkien niiden ionien, joilla on sama ominaisvaraus (q/m), ratojen säteet ovat yhtä suuret. Saman alkuaineen eri isotoopit erottuvat toisistaan, koska niillä on eri massat.

Esimerkki 4

Massaspektrometrissa kiihdytetään $^{24}_{12}\mathrm{Mg}^{2+}$-ioneja. Kiihdytysjännite on 0,95 kV. Ionit suunnataan kohtisuorasti magneettikenttään, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 62 mT. Kyseisten Mg^{2+}-ionien massa on 23,98 u (u on atomimassayksikkö). Laske ionien radan säde magneettikentässä.
Huomaa: Eri isotooppien atomimassoja löytyy taulukkokirjasta. Atomimassaa voidaan käyttää myös ionin massana.

$U = 0{,}95\ \mathrm{kV}, \quad B = 62\ \mathrm{mT}, \quad m = 23{,}98\ \mathrm{u},$
$\mathrm{u} = 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}, \quad q = 2 \cdot e = 2 \cdot 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$

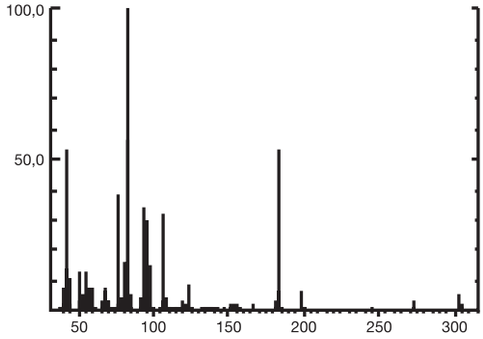
Työperiaatteen mukaan sähköisen voiman Mg^{2+}-ioneille tekemä työ $W = qU$ muuntuu ionien liike-energiaksi. Yhtälöstä $qU = \frac{1}{2}mv^2$ saadaan ionien nopeudeksi

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} \cdot 0{,}95\ \mathrm{kV}}{23{,}98 \cdot 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}}}$$
$$\approx 1{,}23651 \cdot 10^{5}\ \mathrm{m/s}.$$

Mg^{2+}-ionien liikeyhtälö on $\sum \overline{F} = m\overline{a}_\mathrm{n}$. Kun suunta radan keskipisteeseen on positiivinen, skalaariyhtälöstä $qvB = \frac{mv^2}{r}$ saadaan ionien radan säteeksi

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{23{,}98 \cdot 1{,}6605402 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \cdot 1{,}23651 \cdot 10^{5}\ \mathrm{m/s}}{2 \cdot 1{,}6021773 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} \cdot 62\ \mathrm{mT}}$$
$$\approx 0{,}25\ \mathrm{m}.$$

Radan säde on 25 cm.



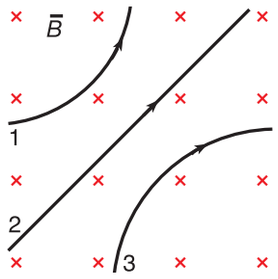
Hiukselle tehtävä massaspektrometrinen tutkimus on yksi osa huumetestiä, jonka avulla voidaan selvittää mm. kokaiinin käyttö. Hiuksesta tehtyä massaspektriä verrataan kuvassa olevaan kokaiinin massaspektriin. Piirroksen vaaka-akselilla on massan ja varauksen suhde ja pystyakselilla aineiden suhteutettu määrä.

Pohdi ja etsi

1-15. Homogeenisen magneettikentän suunta on pohjoisesta etelään. Minkä suuntainen magneettinen voima kohdistuu positiivisesti varattuun hiukkaseen, joka liikkuu a) etelästä pohjoiseen b) lännestä itään?

1-16. Kuumaa plasmaa voidaan säilyttää ns. magneettisessa pullossa. Mitä tämä tarkoittaa?

1-17. a) Hiukkaset 1, 2 ja 3 kulkevat magneettikentässä kuvan mukaisesti kohtisuorasti kenttää vastaan. Mitä voit päätellä hiukkasista niiden ratojen perusteella?



b) Minkälaiselle radalle vinosti magneettikenttään tuleva varattu hiukkanen joutuu?

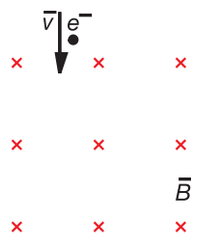
1-18. Positiivisesti varattu hiukkanen tulee kohtisuorasti homogeeniseen a) sähkökenttään b) magneettikenttään. Selvitä, millaista hiukkasen liike on kummassakin kentässä.

1-19. a) Miksi syklotronin sähkökentän suuntaa vaihdetaan säännöllisesti?
b) Yksi massaspektrometrin osista on nopeusvalitsin. Selitä, kuinka nopeusvalitsin toimii.

Tehtäviä

1-20. a) Osoita laskemalla, että Maan magneettikentässä liikkuvaan protoniin kohdistuva paino on merkityksetön magneettiseen voimaan verrattuna. Voit olettaa protonin nopeudeksi 1 Mm/s.
b) Osoita yksikkötarkastelua käyttäen, että varattuun hiukkaseen kohdistuvan magneettisen voiman yksikkö on 1 N.

1-21. a) Protoni tulee nopeudella 1,5 Mm/s idästä länteen homogeeniseen magneettikenttään, jonka magneettivuon tiheys on 15 mT ja suunta alas. Laske protoniin kohdistuva magneettinen voima.
b) Elektroni tulee nopeudella 2,5 Mm/s kuvan homogeeniseen magneettikenttään, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 5,5 mT. Laske voima, joka elektroniin kohdistuu magneettikentässä.



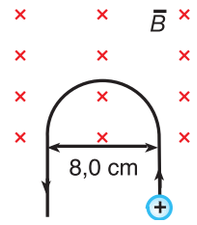
1-22. Ca^{2+}-ionit kiihdytetään 42 kV:n jännitteellä. Ne tulevat kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään, joka on kohtisuorassa sähkökenttää ja ionien nopeutta vastaan. Magneettivuon tiheyden suuruus on 270 mT. Ionin massa on $6{,}6 \cdot 10^{-26}$ kg. Piirrä tilanteesta kuva. Laske sähkökentän voimakkuus, kun ionit jatkavat matkaansa alkuperäisen suuntansa säilyttäen.

1-23. Magneettivuon tiheyttä tutkittaessa asetettiin sähkö- ja magneettikentät kohtisuorasti toisiaan vastaan. Protoneja ammuttiin 1,5 kV:n jännitteellä kiihdyttäen kohtisuorasti kumpaankin kenttään. Sähkökentän voimakkuuden suuruus säädettiin arvoon 7,5 kV/m. Magneettivuon tiheyden suuruus, kun protonit kulkevat suoraviivaisesti kentän läpi on
1) 20 mT 2) 14 mT 3) 0,44 mT 4) 0,014 mT.

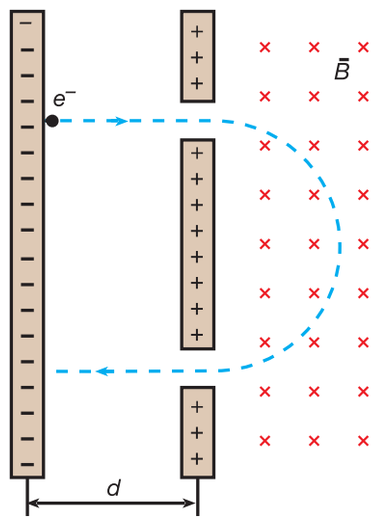
1-24. Protonit saapuvat kohtisuorasti homogeeniseen sähkö- ja magneettikenttään, jotka ovat ristikkäin, nopeudella 1,1 Mm/s. Magneettivuon tiheyden suuruus on 23 mT. Protonit kulkevat kenttien läpi suuntansa säilyttäen. Sähkökentän muodostavien varattujen levyjen välimatka on 16 mm. Laske levyjen välinen jännite.

1-25. Elektroni liikkuu nopeudella 9,0 Mm/s homogeenisessa magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 0,25 mT. Elektronin liikkeen suunta on kohtisuorassa magneettikentän suuntaa vastaan. Laske
a) elektroniin kohdistuva magneettinen voima
b) elektronin radan säde
c) aika, joka elektronilta kuluu magneettikentässä yhteen kierrokseen.

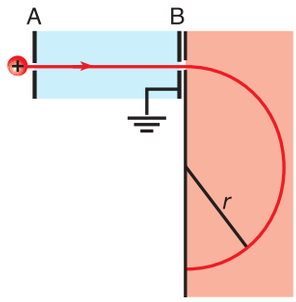
1-26. Protoni kiihdytetään 3,5 kV:n jännitteellä. Protoni saapuu kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään ja tekee siinä puoli kierrosta. Laske magneettivuon tiheyden suuruus, kun protonin radan halkaisija magneettikentässä on 8,0 cm.



1-27. Elektroni lähtee levosta katodilta, ja se kiihdytetään sähkökentässä matkalla $d = 1{,}00$ m jännitteellä $U = 510$ V. Kiihdytyksen jälkeen se tulee liikesuuntaansa vastaan kohtisuoraan homogeeniseen magneettikenttään (magneettivuon tiheyden suuruus $B = 0{,}10$ mT), joka kääntää sen liikesuunnan vastakkaiseksi alkuperäiseen verrattuna, jolloin elektroni joutuu takaisin sähkökenttään.
a) Mikä on elektronin radan säde magneettikentässä?
b) Mikä on elektronin nopeus, kun se saapuu takaisin katodille?
c) Kuinka paljon elektronilta menee aikaa koko matkaan katodilta takaisin katodille?
[TKK 2000]



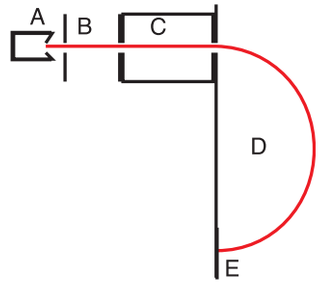
1-28. Kiihdyttimestä tulevan $^{12}C^{+}$-ionisuihkun ionien energia on 65 keV. Ionit hidastetaan metallilevyjen A ja B välisellä sähkökentällä (kuva) sellaiseen nopeuteen, että niiden puoliympyrän muotoisen radan säde magneettikentässä ($B = 0{,}147$ T) on 48 cm. Kuinka suuri on levyn A potentiaali, kun levyn B potentiaali on 0 V? Piirrä kuvio, josta ilmenee sähkökentän ja magneettikentän suunta. [K2006, 8]



1-29. Syklotronin magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 0,45 T ja D-elektrodien säde on 0,66 m.
a) Laske, mikä on kiihdytettyjen protonien liike-energia niiden poistuessa syklotronista.
b) Millä taajuudella protoneja on kiihdytettävä?

1-30. Syklotronilla kiihdytetään deuteroneja. Kun hiukkasten uloimman radan säde on 0,45 m, niiden liike-energia on 9,6 MeV. Laske a) kiihdytysjännitteen taajuus b) hiukkasten ratatasoa vastaan kohtisuoran magneettikentän magneettivuon tiheys. [S2004, 14]

1-31. a) Massaspektrometrin toimintaperiaate on pääpiirteiltään oheisen kaavion mukainen. Selitä kuvaan merkittyjen osien toiminta ionilähteestä A alkaen. Piirrä kaavio, josta ilmenevät tarvittavien sähkö- ja magneettikenttien suunnat.
b) Kun tinaa tutkittiin massaspektrometrilla, todettiin $^{114}Sn^{+}$- ja $^{115}Sn^{+}$-ionien osumakohtien etäisyydeksi valokuvauslevyllä 10,2 mm. Laske analysoivan magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus, kun osassa C (kuvio) sähkökentän voimakkuus on suuruudeltaan 28,6 kV/m ja magneettivuon tiheys 0,110 T.



1-32. Alfahiukkasia (He^{2+}) kiihdytetään tyhjiössä van de Graaffin kiihdyttimellä. Jännitteellä 2,1 MV kiihdytetty α-hiukkassuihku osuu kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään, jossa sen suunta muuttuu 90° siten, että hiukkasten ratakäyrän säde on 1,0 m. Kuinka suuri on magneettikentän magneettivuon tiheys? [K2004, 7]

1-33. Protoni kiihdytetään ensin sähkökentässä 0,10 m:n matkalla jännitteellä 0,100 MV, minkä jälkeen se ohjataan kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään. Tällöin se joutuu ympyräradalle, jonka säde on 0,30 m.
a) Laske magneettivuon tiheyden suuruus.
b) Miten ja millaiseksi protonin rata muuttuu, jos se tulee vinosti magneettikenttään, jolloin tulokulma α nopeusvektorin ja magneettikentän välillä on $0° < \alpha < 90°$?

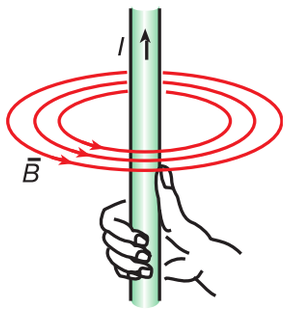
1.3 Virtajohdin magneettikentässä

Virtajohtimen magneettikenttä

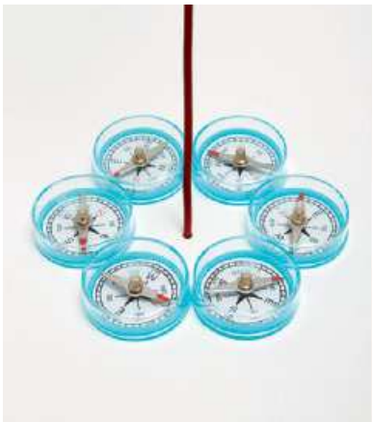
Oppilastyö ▪ Virtajohtimen magneettikenttä
Aseta kompassineulan päälle sen kanssa samansuuntainen johdin. Kytke johtimeen sähkövirta ja tarkkaile kompassineulaa. Nosta kompassi johtimen päälle ja toista koe. Vaihda sähkövirran suunta. Mitä havaitset?

Oppilastyössä todettiin, että kompassineula kääntyy johtimeen nähden poikittain sähkövirran kytkemisen jälkeen. Kun sähkövirran suunta muutettiin, kompassineula kääntyi vastakkaiseen suuntaan. Oppilastyön koe osoittaa, että **sähkövirta synnyttää** johtimen ympärille **magneettikentän**. Sen kenttäviivat kiertävät johdinta; johtimen ylä- ja alapuolella magneettikenttä osoittaa vastakkaisiin suuntiin. Kenttäviivojen kiertosuunta riippuu sähkövirran suunnasta. Magneettikentän suunta saadaan suoran johtimen oikean käden säännöstä.

Virtajohtimen magneettikenttä
Sähkövirta synnyttää johtimen ympärille magneettikentän, jonka kenttäviivat ovat ympyröitä johdinta vastaan kohtisuorassa tasossa. Kentän suunta päätellään oikean käden säännön avulla.



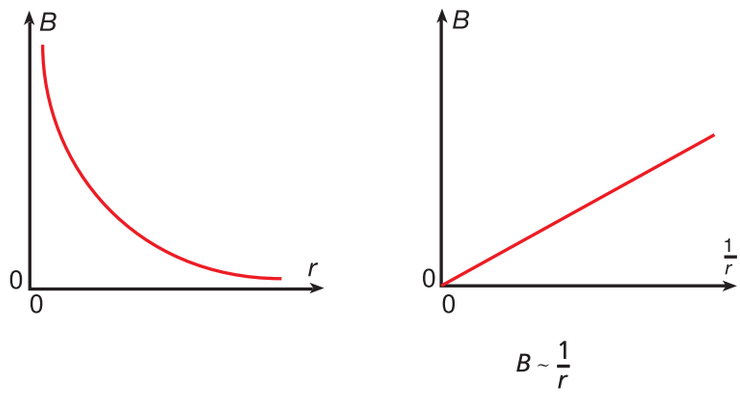
Oikean käden sääntö: kun johtimen ympärille kierretyn oikean käden peukalo osoittaa virran suuntaan, muut sormet osoittavat magneettikentän suunnan.



Oppilastyö ▪ Magneettivuon tiheys lähellä johdinta

Aseta kahden eristepylvään väliin suora sähköjohdin. Kytke johdin tasajännitelähteeseen, käytä 1–2 ampeerin sähkövirtaa. Tutki tietokoneeseen kytketyn magneettikenttäanturin avulla suoran sähköjohtimen ympärilleen synnyttämän magneettivuon tiheyttä (magneettikentän voimakkuutta) eri etäisyyksiltä johtimesta. Muuta myös sähkövirran voimakkuutta. Mitä voit päätellä mittaustuloksista?

Oppilastyössä havaittiin, että johtimen ympärillä olevan magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus kasvaa, kun sähkövirta kasvaa eli $B \sim I$. Edelleen havaittiin, että magneettivuon tiheyden suuruus pienenee etäisyyden kasvaessa. Kun mittaustulokset esitettiin $\left(\frac{1}{r}, B\right)$-koordinaatistossa, ne asettuivat mittaustarkkuuden rajoissa peräkkäin samalle suoralle. Näin ollen magneettivuon tiheyden suuruus on verrannollinen etäisyyden käänteisarvoon eli $B \sim \frac{1}{r}$.



Biot'n ja Savartin laki

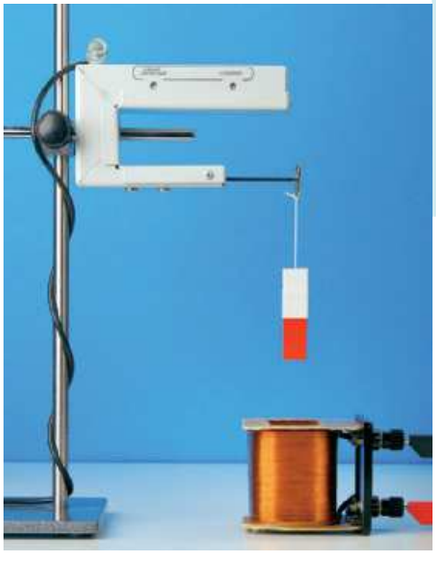
Suoran virtajohtimen magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus etäisyydellä r johtimesta on

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

jossa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, I sähköjohtimessa kulkeva sähkövirta ja r etäisyys johtimesta.

Virtajohtimen magneettikentän voimakkuus riippuu johtimessa kulkevasta sähkövirrasta.

Virtajohdin ulkoisessa magneettikentässä

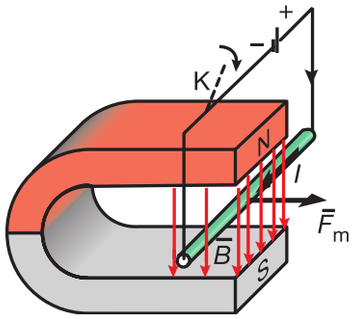


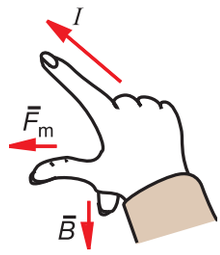
Oppilastyö ▪ Suora virtajohdin magneettikentässä

1. Aseta kevyt johdintanko kuvan mukaisesti riippumaan U-magneetin sisälle. Sulje virtapiiri ja tarkkaile tangon liikettä magneettikentässä. Vaihda virran suuntaa ja tarkkaile tangon liikettä. Päättele johtimeen kohdistuvan voiman suunta. Toista koe käyttäen voimakkuudeltaan erilaista U-magneettia ja sähkövirtaa.

2. Kiinnitä tankomagneetti riippumaan pystyasennossa voima-anturiin. Kalibroi voima-anturi näyttämään nollaa, jolloin tankomagneettiin kohdistuva paino ei vaikuta mittaustuloksiin. Aseta tankomagneetti käämin yläpuolelle. Käämin akselin on oltava pystyasennossa. Kytke käämiin sähkövirta siten, että käämi ja tankomagneetti vetävät toisiaan puoleensa. Taulukoi käämissä kulkeva sähkövirta ja voima-anturin lukema. Toista koe useilla sähkövirran arvoilla. Käytä myös käämejä, joissa on eri määrä kierroksia. Esitä mittaustulokset (I, F)-koordinaatistossa.

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa havaittiin, että virtapiirin sulkemisen jälkeen johdin heilahti. Kun sähkövirran suunta vaihtui, myös heilahduksen suunta vaihtui. Kun käytettiin voimakkaampaa magneettia ja suurempaa sähkövirtaa, johtimen heilahdus kasvoi. Johtimeen kohdistuu magneettikentässä magneettinen voima.

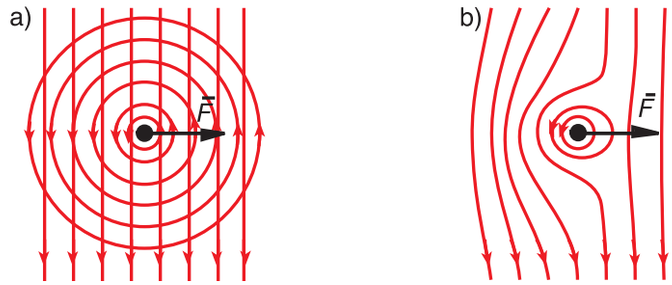




$\bar{F}_m \perp I \perp \bar{B}$

Kuvan tilanteessa **magneettinen voima on kohtisuorassa johdinta ja** U-magneetin **magneettikentän suuntaa vastaan**. Voima on sitä suurempi, mitä voimakkaampi magneettikenttä on tai mitä suurempi sähkövirta on. Virtajohtimeen kohdistuva **voima aiheutuu** johtimessa liikkuvien **elektronien ja magneettikentän vuorovaikutuksesta**.

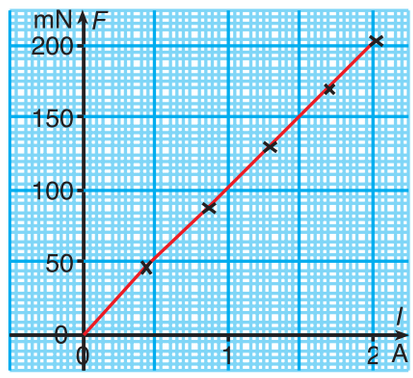
Virtajohtimeen kohdistuvan magneettisen voiman suunta saadaan **oikean käden säännöstä**. Etusormi osoittaa sähkövirran suunnan, keskisormi magneettivuon tiheyden suunnan ja peukalo voiman suunnan.



Piirroksessa on esitetty magneettikentän vaikutus virtajohtimeen. Kohdassa a on magneetin ja virtajohtimen kentät, kohdassa b niiden resultanttikenttä. Magneettisen voiman suunta päätellään oikean käden säännön perusteella.

Oppilastyön toisessa kohdassa havaittiin, että voima-anturin lukema oli sitä suurempi, mitä suurempi sähkövirta käämissä kulki ja mitä enemmän käämissä oli kierroksia. Kun taulukoidut mittaustulokset siirrettiin (I, F)-koordinaatistoon, mittauspisteet asettuivat mittaustarkkuuden rajoissa peräkkäin samalla suoralle. Näin ollen voiman suuruus on verrannollinen käämissä kulkevaan sähkövirtaan eli $F \sim I$.

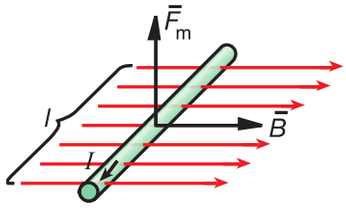
I/A	*F*/mN
0	0
0,44	46
0,84	86
1,29	130
1,70	170
2,02	205



$F \sim I$

Oletetaan, että magneettikenttää vastaan kohtisuorassa olevassa johtimessa kulkee varattuja hiukkasia, joiden yhteenlaskettu varaus on ΔQ. Varauksiin kohdistuvan, magneettikentän aiheuttaman kokonaisvoiman suuruus on $F_\mathrm{m} = \Delta QvB$. Jos johtimen pituus on l ja varatut hiukkaset kulkevat johtimen läpi ajassa Δt, voidaan voiman lauseke kirjoittaa muotoon

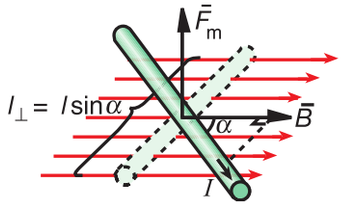
$$F_\mathrm{m} = \Delta QvB = \Delta Q\frac{l}{\Delta t}B = \frac{\Delta Q}{\Delta t}lB = IlB.$$



Virtajohdin ulkoisessa magneettikentässä
Jos suora virtajohdin on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, magneettikentästä johtimeen kohdistuvan magneettisen voiman $\bar{F}_\mathrm{m}$ suuruus on

$$F_\mathrm{m} = IlB,$$

jossa I on johtimessa kulkeva sähkövirta, l johtimen magneettikentässä olevan osan pituus ja B magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus.
Voiman suunta päätellään oikean käden säännön avulla.



$F_\mathrm{m} = IlB\sin\alpha$,
$\bar{F} \perp \bar{l}$,
$\bar{F} \perp \bar{B}$, mutta
$(\bar{l}, \bar{B}) = \alpha$

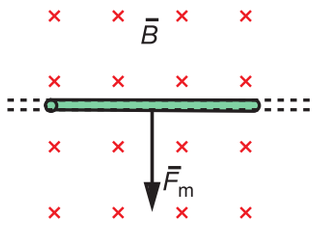
Jos magneettivuon tiheyden (myös magneettikentän) ja johtimen välinen **kulma ei ole suora**, magneettista voimaa laskettaessa on käytettävä **johtimen** pituuden **kenttää vastaan kohtisuoraa projektiota** (tai magneettikentän johdinta vastaan kohtisuoraa komponenttia). Tällöin voiman $\bar{F}_\mathrm{m}$ suuruus on

$$F_\mathrm{m} = Il_\perp B = Il\sin\alpha \cdot B = IlB\sin\alpha,$$

jossa kulma α on johtimen pituuden ja magneettikentän kenttäviivojen suunnan välinen kulma. Jos sähköjohdin on kenttäviivojen suuntainen eli kulma $\alpha = 0°$, johtimeen ei kohdistu lainkaan magneetista voimaa.

Huomaa: Jos kulma $\alpha = 90°$, virtajohtimeen kohdistuva voima on kohtisuorassa kenttää ja johdinta vastaan: tällöin $F_\mathrm{m} = IlB$.

Esimerkki 5



Sähköjohtimen pituudesta 55 cm on kuvan mukaisesti magneettikentässä.
a) Päättele sähkövirran suunta johtimessa.
b) Johtimeen kohdistuva magneettinen voima oli 16 mN, kun johtimessa kulki 12 A:n sähkövirta. Laske magneettivuon tiheys.

$l = 0{,}55$ m, $\quad F_m = 16$ mN, $\quad I = 12$ A

a) Sähkövirran suunta saadaan oikean käden säännön avulla. Kun peukalo asetetaan voiman suuntaan, keskisormi poispäin tasosta (katsojasta), etusormi osoittaa sähkövirran suunnan. Sähkövirran suunta johtimessa on vasemmalle.

b) Koska johdin on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, yhtälöstä $F_m = IlB$ magneettivuon tiheyden suuruudeksi saadaan

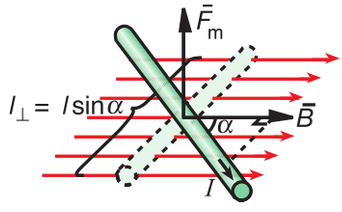
$$B = \frac{F_m}{Il} = \frac{16\text{ mN}}{12\text{ A} \cdot 0{,}55\text{ m}} \approx 2{,}4\text{ mT}.$$

Magneettivuon tiheys on 2,4 mT ja suunta poispäin katsojasta.

Esimerkki 6

Sähköjohdin on homogeenisessa magneettikentässä siten, että johdin muodostaa magneettivuon tiheyden kanssa 45°:n kulman. Johtimesta on magneettikentässä 8,5 cm pitkä osa, ja siinä kulkee 1,3 A:n sähkövirta. Kenttä vaikuttaa johtimeen 2,1 mN:n suuruisella voimalla. Laske magneettikentän magneettivuon tiheys.

$l = 0{,}085$ m, $\quad I = 1{,}3$ A, $\quad F_m = 2{,}1$ mN, $\quad \alpha = 45°$



Koska johdin muodostaa kenttäviivojen kanssa 45°:n kulman, johtimen pituuden kenttää vastaan kohtisuora projektio on $l_\perp = l\sin\alpha = 0{,}085\text{ m} \cdot \sin 45°$. Yhtälöstä $F_m = Il_\perp B$ magneettivuon tiheyden suuruus on

$$B = \frac{F_m}{Il_\perp} = \frac{F_m}{Il\sin\alpha} = \frac{2{,}1\text{ mN}}{1{,}3\text{ A} \cdot 0{,}085\text{ m} \cdot \sin 45°} \approx 27\text{ mT}.$$

Magneettivuon tiheys on 27 mT ja suunta kuvassa oikealle.

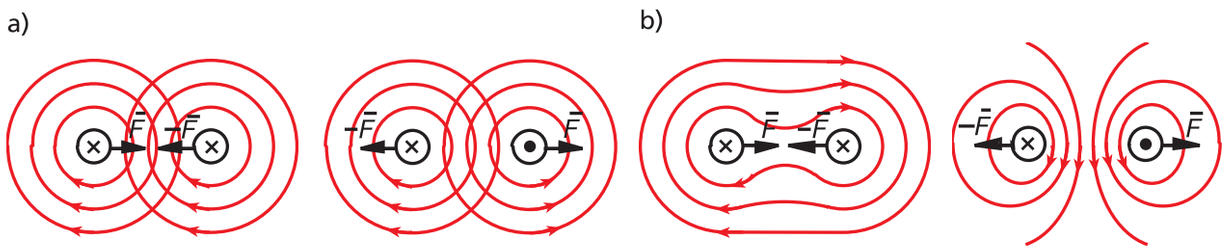
Yhdensuuntaisten virtajohtimien välinen vuorovaikutus

Katso tehtävä 1-39.

Oppilastyö ▪ Sähkövirta yhdensuuntaisissa johtimissa
Aseta kaksi kevyttä, pitkää sähköjohdinta yhdensuuntaisesti lähelle toisiaan ja yhdistä ne tasajännitelähteeseen. Tarkkaile johtimia, kun sähkövirrat johtimissa kulkevat a) samaan suuntaan b) vastakkaisiin suuntiin.

Koska sähkövirta synnyttää johtimen ympärille magneettikentän, kahden lähekkäisen virtajohtimen välillä on magneettinen vuorovaikutus. Oppilastyössä todettiin, että johtimet vetivät toisiaan puoleensa, kun sähkövirrat olivat samansuuntaiset, ja hylkivät toisiaan, kun sähkövirta kulki johtimissa vastakkaisiin suuntiin.

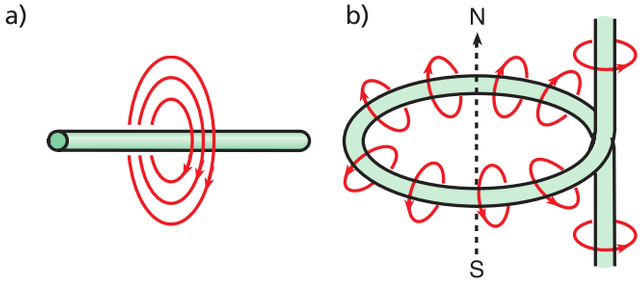
Sähkövirta yhdensuuntaisissa lähekkäin olevissa johtimissa
Kaksi yhdensuuntaista johdinta
– vetävät toisiaan puoleensa, kun virrat johtimissa kulkevat samaan suuntaan
– hylkivät toisiaan, kun virrat johtimissa kulkevat vastakkaisiin suuntiin.



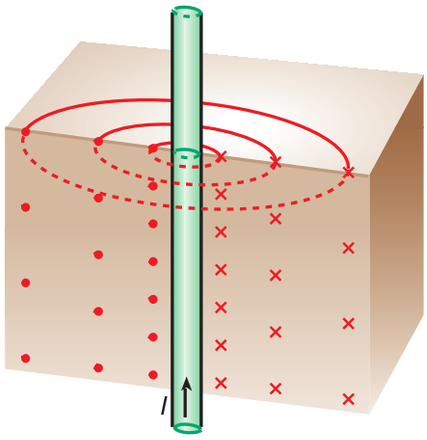
Piirroksessa a on yhdensuuntaisten virtajohtimien magneettikentät ja piirroksessa b resultanttikentät. Johtimiin vaikuttavat voimat ovat Newtonin III lain mukaan yhtä suuret mutta vastakkaissuuntaiset.

Sähkövirran SI-järjestelmän mukainen yksikkö **ampeeri** määritellään yhdensuuntaisten virtajohtimien välisen voimavaikutuksen perusteella: kahdessa yhdensuuntaisessa, hyvin pitkässä ja ohuessa johtimessa, jotka ovat metrin etäisyydellä toisistaan, kulkee ampeerin suuruiset virrat, jos metrin mittaiset osat johtimia aiheuttavat toisiinsa $2 \cdot 10^{-7}$ newtonin voiman.

1-34. Päättele kuvista sähkövirran suunta.

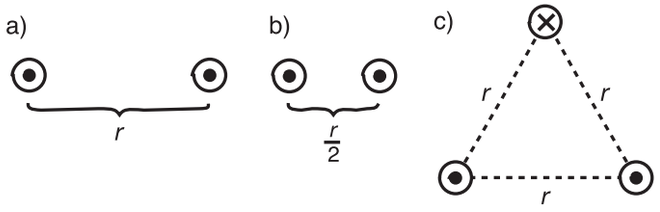


1-35. Kuvassa on virtajohdin, jossa sähkövirran suunta on alhaalta ylös. Magneettikenttää johtimen ympärillä kuvataan pisteillä ja rasteilla.
a) Millainen magneettikenttä johtimen ympärillä on?
b) Miksi pisteiden tiheys ei ole vakio?
c) Kuvittele katsovasi samaa johdinta ylhäältäpäin ja piirrä sen magneettikentän kenttäviivoja.



1-36. Kuinka virtajohdin tulee asettaa homogeeniseen magneettikenttään, jotta johtimeen kohdistuva magneettinen voima olisi mahdollisimman a) pieni b) suuri?

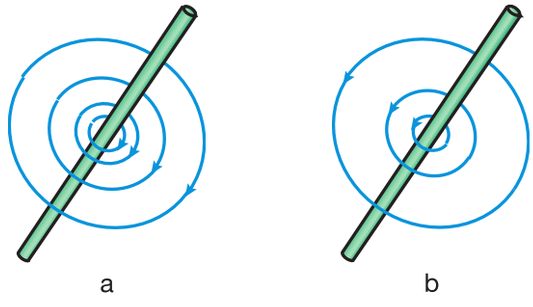
1-37. Piirrä kuvioihin sähköjohtimien välisiä magneettisia vuorovaikutuksia kuvaavat voimavektorit. Kaikki sähkövirrat ovat keskenään yhtä suuria.



1-38. Maanpinnan alla olevassa kaapelissa kulkee voimakas tasavirta koilliseen. Suunnistaja määrittää kompassilla suuntaa 1,5 m tämän kaapelin yläpuolella. Deklinaatio on 0°. Pohdi ja selitä, millainen virhe kompassin lukemaan tulee.

1-39. a) Ampèren laki $F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{r} l$ liittyy yhdensuuntaisten virtajohtimien välisiin voimiin. Päättele, mitä laissa olevat merkinnät tarkoittavat.
b) Yhdensuuntaisissa 1,4 m pitkissä sähköjohtimissa kulkee kummassakin 2,5 A:n sähkövirta samaan suuntaan. Johtimien välinen etäisyys on 0,19 m. Laske kumpaankin virtajohtimeen kohdistuva voima.

1-40. Kuvissa on esitetty suoran virtajohtimen magneettikenttä.



a) Päättele kummassakin tilanteessa sähkövirran suunta.
b) Kummassa johtimessa kulkeva sähkövirta on suurempi?

Tehtäviä

1-41. a) Magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 1,8 mT ja suunta poispäin katsojasta. Magneettikenttää vastaan kohtisuorassa olevan 9,5 cm pitkän johtimen läpi kulkee 0,75 A:n virta. Piirrä kuva tilanteesta. Laske johtimeen kohdistuva magneettinen voima.
b) Homogeenisessa magneettikentässä on 12 cm pitkä suora sähköjohdin, jossa kulkee 1,5 A:n virta. Kenttä vaikuttaa johtimeen 2,7 mN:n suuruisella voimalla. Kuinka johdin tulee asettaa magneettikenttään, jotta johtimeen kohdistuisi mahdollisimman suuri voima? Laske, mikä tällöin on magneettivuon tiheyden suuruus.

1-42. Homogeenisen magneettikentän magneettivuon tiheys on 0,75 T ja suunta vaakasuora katsojasta poispäin. Kentässä on vasen–oikeasuunnassa virtajohdin, joka on kohtisuorassa kenttäviivoja vastaan. Johtimen massa on 2,5 g metriä kohti. Johdin pysyy paikallaan magneettikentässä, jolloin johtimeen kohdistuva magneettinen voima on yhtä suuri kuin johtimeen kohdistuva paino. Kuinka suuri ja minkä suuntainen johtimessa kulkeva virta tällöin on?

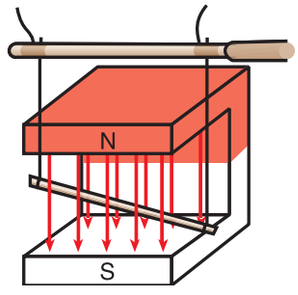
1-43. Magneettikenttä muodostaa 72°:n kulman vaakatasoon nähden, ja sen magneettivuon tiheyden suuruus on 35 μT. Magneettikentässä on virtajohdin, jonka pituus on 150 m ja jossa kulkee 95 A:n virta idästä länteen päin. Laske johtimeen kohdistuva magneettinen voima. Magneettikentän vaakasuora komponentti suuntautuu lähes pohjoiseen. Piirrä kuvio.

1-44. Maan magneettikentän magneettivuon tiheys eräällä seudulla on 49 μT, inklinaatio 71° ja deklinaatio 0°. Kentässä on 0,50 m pitkä pystysuora johtimen osa, jossa kulkee 4,0 A:n sähkövirta alaspäin. Määritä johtimeen kohdistuva magneettinen voima. Piirrä kuvio.

1-45. Salamaniskussa purkautuva sähkövirta voi olla 10 kA. Laske magneettivuon tiheyden suuruus etäisyyksillä 10 m, 100 m ja 1 km salaman iskukanavasta.

1-46. Vaakasuora alumiinijohdin leijuu homogeenisessa, johdinta vastaan kohtisuorassa magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 0,56 T. Johtimen säde on 0,50 mm, ja siinä kulkee tasavirta.
a) Piirrä johdin, virran suunta, magneettikenttä ja johtimeen vaikuttavat voimat.
b) Laske johtimessa kulkevan sähkövirran suuruus.

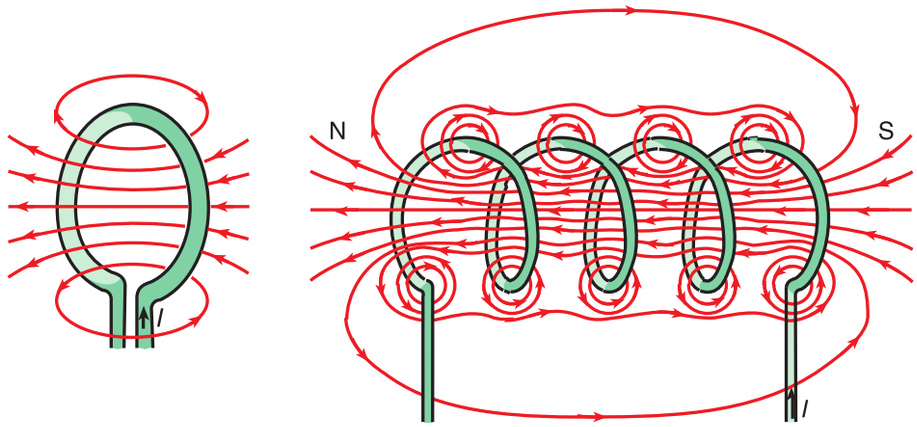
1-47. Kevyt alumiinisauva on ripustettu U-magneetin napojen väliin kuvan mukaisesti. Magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 25 mT. Sauva on magneettikentässä vinosti, 15°:n kulmassa vaakatasoon nähden. Sauvasta on magneettikentässä 9,0 cm:n pituinen osa. Kun sauvaan kytketään 3,1 A:n sähkövirta, sauvan havaitaan heilahtavan poispäin magneetista. Sähkövirran suunta ja magneettisen voiman suuruus alumiinisauvassa on
1) takaa eteenpäin 6,7 mN
2) edestä taaksepäin 6,7 mN
3) takaa eteenpäin 7,0 mN
4) edestä taaksepäin 7,0 mN.



1.4 Käämi magneettikentässä

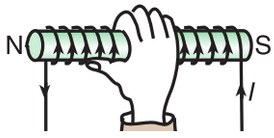
Käämin oikean käden sääntö

Kuvassa suora johdin on kierretty silmukaksi. Silmukassa kulkee sähkövirta, jonka synnyttämä magneettikenttä silmukan sisällä on kohtisuorassa silmukan tasoa vastaan. Magneettikenttää kuvaavien kenttäviivojen tiheys silmukan sisällä on suurempi kuin ulkopuolella.



Johdinsilmukan ja käämin magneettikenttä.

Kun eristettyä sähköjohdinta kierretään useita kierroksia, saadaan käämi. Käämin sisällä magneettikenttä on homogeeninen eli magneettikenttä on joka kohdassa lähes yhtä voimakas ja kenttäviivat ovat samansuuntaisia.

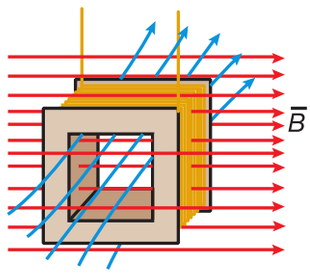


Käämin oikean käden sääntö
Käämin sisällä olevan magneettikentän suunta saadaan käämin oikean käden säännöstä. Jos sormet osoittavat käämissä kulkevan sähkövirran suuntaan, peukalo osoittaa kohti käämin sisällä olevan magneettikentän pohjoiskohtiota.

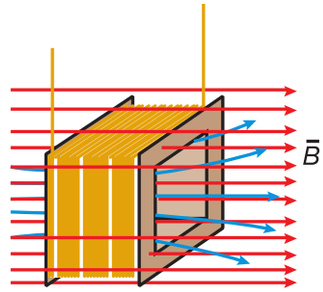
Momentti

Oppilastyö ▪ Käämi ulkoisessa magneettikentässä

1. Aseta pienikokoinen ja kevyt käämi riippumaan tukilankojen tai sähköjohtojensa varassa voimakkaan U-magneetin magneettikenttään siten, että magneetin magneettikentän kenttäviivat kulkevat käämin silmukoiden tasossa. Kytke sähkövirta käämiin ja tarkkaile käämiä. Katkaise virta ja tarkkaile käämiä. Muuta sähkövirran suuntaa käämissä. Mitä havaitset?
Käännä käämin silmukoiden taso kohtisuoraan magneetin kenttäviivoja vastaan ja toista koe. Mitä havaitset?
2. Pidä käämiä paikallaan U-magneetin kenttäviivoihin nähden vinossa alkuasennossa esimerkiksi käämiin yhdistetyn langan ja herkän jousivaa'an avulla. Mittaa käämiin kohdistuvan voiman suuruutta, kun a) muutat sähkövirran suuruutta b) käytät käämiä, jossa on enemmän kierroksia c) käytät voimakkaampaa magneettia.



Käämin asento alussa.



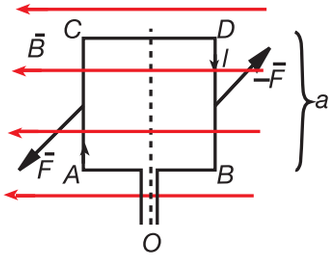
Käämin asento lopussa.

Ulkoinen magneettikenttä on piirretty punaisella, käämin magneettikenttä sinisellä.

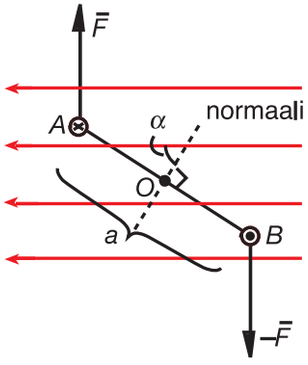
Kun oppilastyössä käämiin kytkettiin sähkövirta, käämi pyrki kääntymään. Käämiin kohdistuva vääntö on voimakkain, kun magneettikentän kenttäviivat ovat käämin silmukoiden tason suuntaiset. Vääntöä ei ole, kun magneettikentän kenttäviivat kulkevat kohtisuorasti käämin silmukoiden läpi. Käämin kiertymissuunta vaihtui, kun sähkövirran suunta vaihtui.

Magneettikenttä aiheutti käämiä vääntävän **momentin**. Käämi pyrkii kääntymään magneettikentässä asentoon, jossa käämin magneettikentän kenttäviivat ovat samansuuntaiset ulkoisen magneettikentän kenttäviivojen kanssa.

Oppilastyön toisessa kohdassa havaittiin, että käämiin kohdistuva vääntö on sitä suurempi, mitä voimakkaampi magneetti ja sen magneettikenttä on, mitä suurempi käämissä kulkeva sähkövirta on ja mitä enemmän käämissä on kierroksia.



Virtajohdinsilmukka magneettikentässä.



Silmukka alhaalta katsottuna.

Tarkastellaan neliön muotoista virtajohdinsilmukkaa, joka pääsee pyörimään homogeenisessa magneettikentässä akselinsa O ympäri. Virtasilmukan sivun pituus on a ja silmukan pinta-ala $A = a^2$. Silmukan akseli on kohtisuorassa kenttää vastaan. Kulma α on sivun a normaalin ja magneettikentän kenttäviivojen välinen kulma. Silmukan sivuihin AB ja CD vaikuttavat voimat ovat akselin suuntaisia tai nollia, joten ne eivät kohdista silmukkaan momenttia. Kyseiset voimat ovat myös vastakkaissuuntaisia ja yhtä suuria, joten ne kumoavat toisensa. Magneettikentästä osiin AC ja BD kohdistuvat voimat $F = IaB$ ovat vastakkaissuuntaiset ja yhtä suuret. Nämä voimat muodostavat voimaparin. Ne pyrkivät kiertämään silmukkaa akselin O ympäri kohtisuoraan kentän tasoa vastaan. Momenttien summa akselin O suhteen on

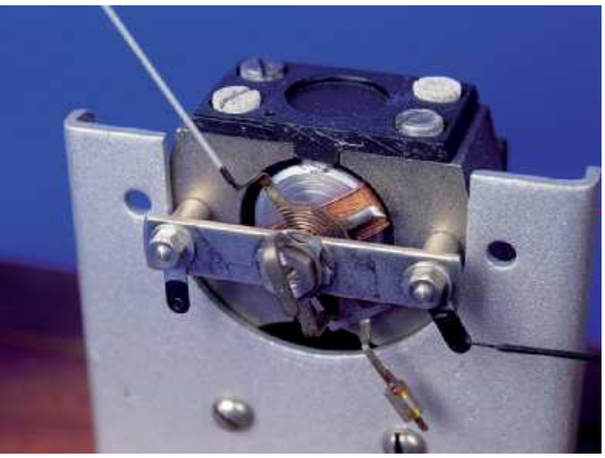
$$\sum M_O = F \cdot \frac{a}{2}\sin\alpha + F \cdot \frac{a}{2}\sin\alpha = Fa\sin\alpha$$
$$= IaB \cdot a\sin\alpha = Ia^2B\sin\alpha = IAB\sin\alpha.$$

Näin ollen magneettikentässä virtasilmukkaan vaikuttava momentti on $M = IAB\sin\alpha$.

Momentin $M = IAB\sin\alpha$ arvo on

- suurin, kun silmukan taso on magneettikentän kenttäviivojen suuntainen eli käämin silmukoiden tason normaali on kohtisuorassa magneettikentän kenttäviivoja vastaan; tällöin kulma $\alpha = 90°$ ja $\sin\alpha = 1$
- nolla, kun silmukan taso on kohtisuorassa magneettikentän kenttäviivoja vastaan eli käämin silmukoiden tason normaali on magneettikentän suuntainen; tällöin $\alpha = 0°$ ja $\sin\alpha = 0$.

Virtajohdinsilmukka pyrkii kääntymään magneettikentässä sellaiseen asentoon, että silmukan magneettikenttä ja ulkoinen magneettikenttä tulevat samansuuntaisiksi silmukan sisällä. Tällöin silmukan taso on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, ja silmukan eri osiin kohdistuvat magneettiset voimat ovat tason suuntaisia: momentti on siis nolla.



Kiertokäämimittari (ampeerimittari) avattuna.

Edellä tarkasteltiin yhtä virtajohdinsilmukkaa. Käämissä havaittava vaikutus on moninkertainen, koska käämi koostuu useista silmukoista. Jos silmukoita on N kappaletta, käämiin kohdistuva momentti on N-kertainen yhteen silmukkaan vaikuttavaan momenttiin verrattuna.

Käämi magneettikentässä

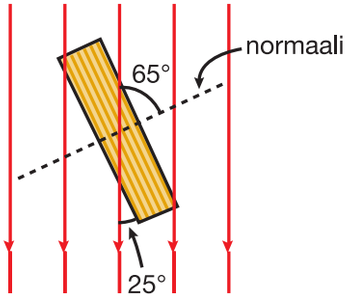
Magneettikentässä olevaan käämiin kohdistuva momentti on

$$M = NIAB\sin\alpha,$$

jossa N on käämin kierrosten määrä, I käämissä kulkeva sähkövirta, A käämin yhden silmukan poikkipinta-ala, B ulkoisen magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus ja α käämin silmukoiden tason normaalin ja magneettikentän välinen kulma.

Esimerkki 7

Homogeenisessa magneettikentässä olevan poikkipinta-alaltaan ympyrän muotoisen käämin halkaisija on 6,8 cm. Käämissä on 660 kierrosta, ja siinä kulkee 1,5 A:n sähkövirta. Käämin silmukoiden tasot muodostavat 25°:n kulman magneettikentän kanssa. Magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 1,2 T. Kuinka suuri on käämiin kohdistuva momentti?



$d = 6{,}8$ cm, $N = 660$, $I = 1{,}5$ A, $B = 1{,}2$ T,
$\alpha = 90° - 25° = 65°$

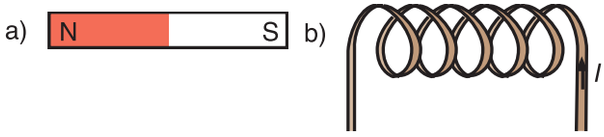
Magneettikentästä käämiin kohdistuva momentti on

$$M = NIBA\sin\alpha = NIB \cdot \pi r^2 \cdot \sin\alpha$$
$$= 660 \cdot 1{,}5\ \text{A} \cdot 1{,}2\ \text{T} \cdot \pi \cdot (0{,}034\ \text{m})^2 \cdot \sin 65° \approx 3{,}9\ \text{Nm}.$$

Momentin suuruus on 3,9 Nm.

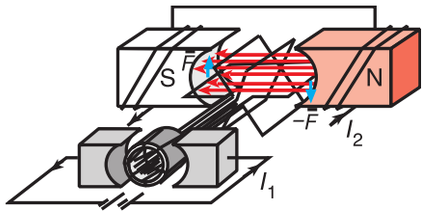
Tehtäviä

1-48. Hahmottele magneettikenttää kuvaavat kenttäviivat.



1-49. Kuinka virtajohdinsilmukka tulee asettaa magneettikenttään, jotta siihen kohdistuva momentti olisi mahdollisimman a) pieni b) suuri?

1-50. Selvitä oheisen yksinkertaistetun tasavirtamoottorin toimintaperiaate ja vastaa kysymyksiin.



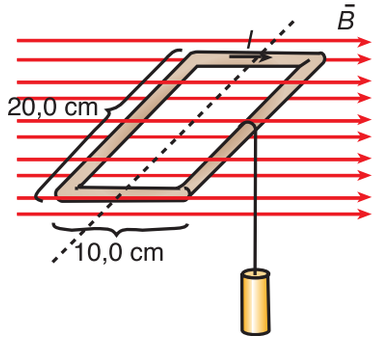
a) Yksinkertaisessa tasavirtamoottorissa sen käämiin vaikuttava momentti on nolla hetkellä, jona virran suunta vaihtuu. Miten tämä vaikuttaa moottorin toimintaan?
b) Miten tasavirran suunnan muuttaminen käämissä vaikuttaa tasavirtamoottorin toimintaan?
c) Miksi tasavirtamoottorissa käytetään yhden silmukan sijasta käämiä?
d) Selvitä, missä tasavirtamoottoreita käytetään.

1-51. Käämin silmukan pituudeksi mitattiin 15,5 cm ja leveydeksi 10,4 cm. Käämi on suorakulmion muotoinen, ja siinä on 18 kierrosta. Käämin läpi kulkevaksi sähkövirraksi mitattiin 1,7 A. Magneettivuon tiheyden suuruus on 23 mT. Kuinka suuri on käämiin kohdistuva momentti, kun
a) käämin silmukoiden taso on yhdensuuntainen magneettikentän kanssa
b) käämiä käännetään siten, että käämin silmukoiden tason ja kenttäviivojen välinen kulma on 25°?

1-52. Ympyrän muotoinen käämi on magneettikenttään nähden 15°:n kulmassa. Käämin halkaisija on 19 cm, ja siinä on 660 johdinkierrosta. Käämin läpi kulkee 1,7 A:n sähkövirta. Magneettivuon tiheyden suuruus on 0,29 T. Kuinka suuri on käämiin kohdistuva momentti?

1-53. Käämin säde on 5,0 cm, ja siinä on 150 kierrosta. Käämissä kulkee 950 mA:n sähkövirta. Käämi on magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 0,30 T. Missä asennossa käämi on silloin, kun siihen kohdistuva momentti on puolet maksimaalisesta tämän magneettikentän aiheuttamasta momentista?

1-54. Johdinsilmukan taso on homogeenisen magneettikentän suuntainen kuvan mukaisesti. Johdinsilmukka pääsee kääntymään akselinsa ympäri. Silmukassa kulkee 3,7 A:n sähkövirta. Silmukkaan on ripustettu punnus, jonka massa on 4,5 g.



a) Kuinka suuri on silmukkaan kohdistuva momentti, jolla punnus pyrkii kääntämään silmukkaa?
b) Kuinka suuri magneettikentän magneettivuon tiheyden on oltava, kun silmukan asento pysyy kuvan mukaisena?

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Maan magneettinen pohjoisnapa
a) on lähellä maantieteellistä pohjoisnapaa
b) on lähellä maantieteellistä etelänapaa
c) vaihtaa paikkaansa Maan ytimessä virtaavan sulan raudan liikkeiden vuoksi.

2. Mitkä seuraavista ovat ferromagneettisia aineita?
a) nikkeli
b) kupari
c) koboltti

3. Varattu hiukkanen voi
a) lähteä liikkeelle sähkökentän vaikutuksesta
b) lähteä liikkeelle magneettikentän vaikutuksesta
c) muuttaa suuntaansa magneettikentän vaikutuksesta, jos hiukkasella on jo nopeutta.

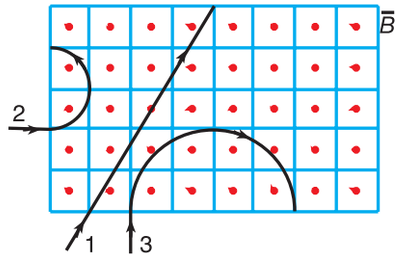
4. Elektroni liikkuu pohjoiseen, ja Maan magneettikentän kohtisuora komponentti osoittaa suoraan alas. Tällöin elektroniin kohdistuvan magneettisen voiman suunta on
a) itään
b) etelään
c) länteen.

5. Homogeenisen magneettikentän kenttäviivat suuntautuvat kohtisuoraan alas. Magneettikentässä on suora sähköjohdin, jossa kulkee sähkövirta etelästä pohjoiseen. Johtimeen kohdistuvan voiman suunta on
a) itään
b) etelään
c) länteen.

6. Suorassa johtimessa (pituus 3,4 m) kulkee 1,6 A:n sähkövirta. Johdin on homogeenisessa magneettikentässä ($B = 88$ mT) vinosti niin, että johtimen ja kentän suunnan välinen kulma on 30°. Magneettisen voiman suuruus on
a) 0,14 N b) 0,24 N c) 0,85 N.

7. Johdinsilmukassa kulkee 1,6 A:n sähkövirta. Silmukka on homogeenisessa magneettikentässä ($B = 88$ mT) vinosti niin, että silmukan tason ja kentän suunnan välinen kulma on 30°. Silmukan pinta-ala on 0,015 m^2. Silmukkaan vaikuttava vääntävä momentti on
a) 0,011 Nm b) 0,018 Nm c) 0,027 Nm.

8. Kolme hiukkasta, joilla kaikilla on sama nopeus, tulee kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään. Hiukkasten radat ovat kuvassa. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?



a) Hiukkasella 1 ei ole sähkövarausta.
b) Hiukkasella 2 on positiivinen sähkövaraus.
c) Hiukkasella 3 on suurempi ominaisvaraus (q/m) kuin hiukkasella 2.

9. Protoni tulee vinosti homogeenisen magneettikentän kenttäviivoja vastaan ja joutuu ympyräliikkeeseen. Protonin nopeus on 1,1 Mm/s, ja magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 9,5 mT. Protonin ympyräliikkeen radan säde on
a) 0,12 m b) 0,83 m c) 1,2 m.

Tiivistelmä

- Magnetismi on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen toinen ilmenemismuoto.
- Magneeteilla on kaksi kohtiota. Samannimiset kohtiot hylkivät toisiaan, ja erinimiset kohtiot vetävät toisiaan puoleensa. Sähkömagneetilla tarkoitetaan rautasydämistä käämiä, jossa kulkee sähkövirta.
- Aineet ryhmitellään sen perusteella, miten ne muuttavat ulkoista magneettikenttää: aineet ovat ferro-, dia- ja paramagneettisia.
- Magneettikenttää kuvataan kenttäviivoilla, jotka ovat suljettuja käyriä.
- Magneettivuon tiheys $\overline{B}$ kuvaa magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa.
- Magneettikentässä liikkuvaan varattuun hiukkaseen kohdistuvan magneettisen voiman $\overline{F}_\mathrm{m}$ suuruus on $F_\mathrm{m} = qvB\sin\alpha$, jossa q on hiukkasen varaus, v hiukkasen nopeus, B magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus ja α hiukkasen nopeuden ja magneettikentän kenttäviivojen välinen kulma.
- Kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään tuleva varattu hiukkanen joutuu tasaiseen ympyräliikkeeseen.
- Sähkövirta synnyttää johtimen ympärille magneettikentän.
- Magneettikentässä olevaan sähköjohtimeen kohdistuvan magneettisen voiman $\overline{F}_\mathrm{m}$ suuruus on $F_\mathrm{m} = IlB\sin\alpha$, jossa I on johtimessa kulkeva sähkövirta, l johtimen pituus, B magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus ja α johtimen ja magneettikentän kenttäviivojen välinen kulma.
- Magneettikentässä olevaan käämiin kohdistuu momentti $M = NIAB\sin\alpha$, jossa käämin johdinkierrosten lukumäärä on N.

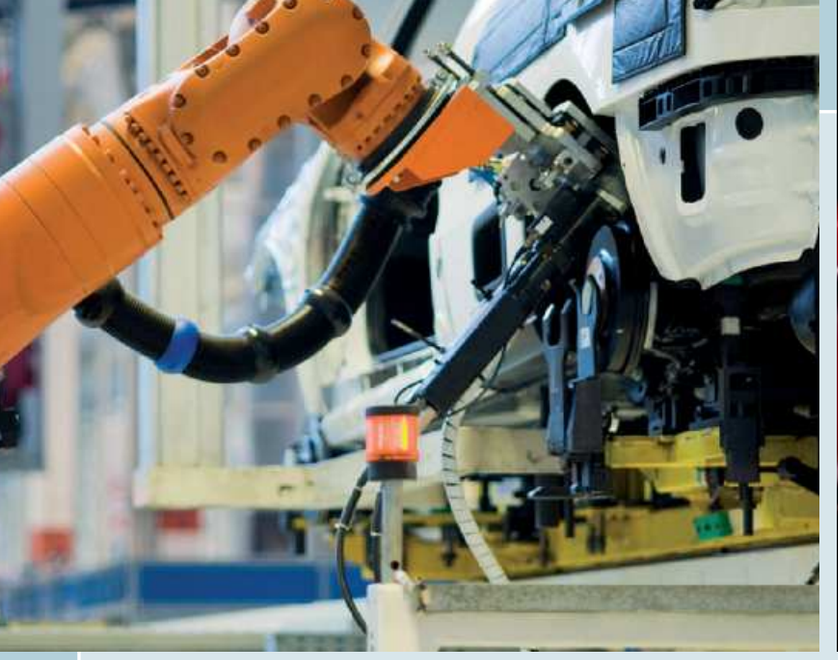
2 Induktio

Tässä luvussa opit

- sähkömagneettisen induktion
- Lenzin lain ja induktiolain
- itseinduktion
- pyörrevirrat
- generaattorin toiminta-periaatteen.

Keskeisiä käsitteitä ovat

- induktiojännite ja -virta
- induktiivinen kytkentä
- induktanssi.



Robotit työssä autotehtaassa. Teollistuminen ei olisi ollut mahdollista ilman sähkömagneettisen induktion ja generaattorin keksimistä.

Sähkökitaran äänentoisto perustuu sähkömagneettiseen induktioon.

Sähkömagnetismin merkitys nyky-yhteiskunnalle on suuri

Mekaaninen energia voidaan muuntaa sähköksi generaattorin avulla. Teollistuneen yhteiskunnan käyttämä sähkö tuotetaan voimalaitosten generaattoreissa, joiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Generaattori tuottaa sähköä riippumatta siitä, mikä generaattorin akselia pyörittää: pyörimiseen tarvittava energia voi olla peräisin esimerkiksi veden liikkeestä tai tuulesta.

Sähkömagneettiseen induktioon perustuvia laitteita ovat mm. muuntaja, miinaharava sekä kaupan kassojen ja lentokenttien turvaportit. Myös junissa käytettävät induktiojarrut ja kodeissa yleistyvät induktioliedet perustuvat sähkömagneettiseen induktioon. Monissa liikennevaloristeyksissä liikennevaloja ohjaa lähestymisanturi. Se on yhteydessä tien päällysteen alle sijoitettuun induktiosilmukkaan, joka havaitsee ylitseen kulkevan auton. Myös musiikkiesityksissä käytettävän dynaamisen mikrofonin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, samoin sähkökitaran äänentoisto.

Sähkömagneettinen induktio osoittaa sähkön ja magnetismin välisen yhteyden.

Sähköhammasharjan akun latautuminen perustuu induktiiviseen kytkentään. Kun hammasharja on laturissa, harjassa ja laturissa olevat käämit ovat sisäkkäin ja muodostavat muuntajan. Hammasharja on muuntajan sekundaaripuoli ja laturi primaaripuoli.

2.1 Sähkömagneettinen induktio

Oppilastyö ▪ Induktioilmiöitä

1. Kytke käämi herkkään ampeerimittariin. **Liikuta kestomagneettia** käämin sisällä. Tarkkaile ampeerimittaria. Toista koe käyttäen voimakkaampaa kestomagneettia ja käämiä, jossa on useampia kierroksia. Muuta myös magneetin liikkumisnopeutta.

2. Pidä kestomagneetti paikallaan ja **liikuta käämiä**. Tarkkaile ampeerimittaria.

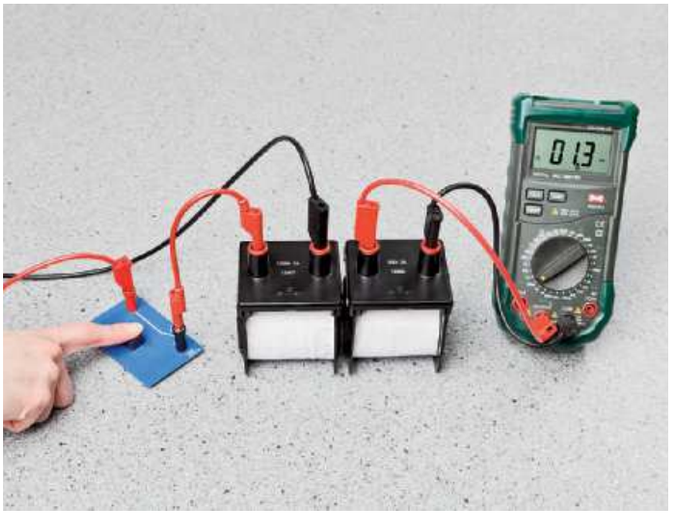
3. Kytke käämi tasajännitelähteeseen. Aseta tämän käämin viereen toinen käämi.

a) Liikuttele käämejä lähellä toisiaan. Tarkkaile toiseen käämiin kytkettyä ampeerimittaria.

b) Tarkkaile mittarin lukemaa virran kytkemis- ja katkaisuhetkellä.

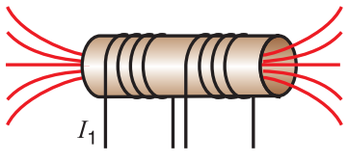
c) Aseta pitkä yhteinen rautasydän kummankin käämin läpi. Kytke toinen käämi vaihtojännitelähteeseen. Kytke toiseen käämiin volttimittari. Miten rautasydän vaikuttaa mittarin lukemaan?

4. Kytke käämiin jänniteanturi ja anturi tietokonepohjaiseen mittausohjelmaan. Pudota kestomagneetti käämin läpi (käytä apuna ohutta lasi- tai muoviputkea). Tutki mittausohjelman piirtämää kuvaa. Miten magneetin pudotuskorkeus vaikuttaa kuvaajaan?

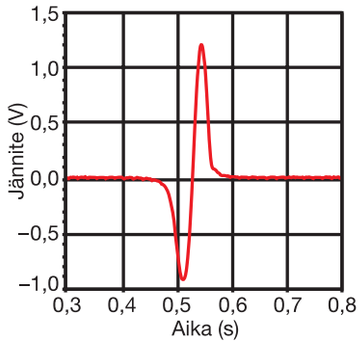


Oppilastyön kohdissa 1 ja 2 havaittiin, että suljettuun virtapiiriin syntyy sähkövirta riippumatta siitä, liikkuuko magneetti vai käämi. Sähkövirta, joka syntyi, kun tankomagneetti työnnettiin käämin sisään, oli vastakkaissuuntainen kuin sähkövirta, joka syntyi, kun magneetti vedettiin pois. Syntyvä sähkövirta on sitä suurempi, mitä voimakkaampi magneetti on ja mitä enemmän käämissä on kierroksia. Kestomagneetin liikenopeuden lisäys lisäsi myös syntyvän sähkövirran suuruutta. Kun kestomagneetti oli paikallaan käämin sisällä, sähkövirtaa ei syntynyt. Magneetin tai käämin liike liittyi jännitteen syntymiseen.

Oppilastyön kohdassa 3 havaittiin sähkövirran kytkemis- ja katkaisuhetkellä toisessa käämissä hetkellinen sähkövirta, vaikka käämit olivat paikallaan. Muuttuva sähkövirta aiheuttaa käämin magneettikentän muuttumisen. Siksi toiseen käämiin syntyy jännite. Kohdassa 3 havaittiin myös, että kun käämit olivat aivan lähekkäin, toiseenkin käämiin indusoitui jännite. Indusoituva jännite kasvoi, kun käämeillä oli yhteinen rautasydän. Kaksi käämiä on kytketty induktiivisesti, jos toisen käämin synnyttämä muuttuva magneettikenttä läpäisee kokonaan tai lähes kokonaan toisen käämin. Rautasydän vahvistaa käämien välistä induktiivista kytkentää.



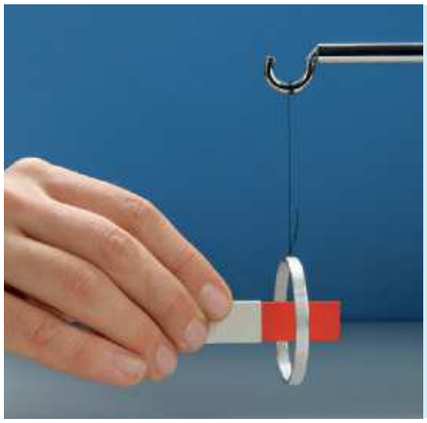
Kaksi induktiivisesti kytkettyä käämiä.



Oppilastyön kohdassa 4 kestomagneetti putoaa käämin läpi. Magneettikentän muutos synnyttää käämin päiden välille jännitteen, jonka käämiin kytketty jänniteanturi havaitsee. Jos magneetti pudotetaan korkeammalta kuin kuvan esittämässä tilanteessa, indusoituva jännite on suurempi eli piikit ovat korkeampia kuin kuvassa. Syntyvään jännitteeseen ja sen etumerkkiin palataan tarkemmin sivulla 70.

Oppilastyössä havaittiin, että **magneettikentän muutos indusoi** (synnyttää) käämiin **jännitteen** (induktiojännitteen). Jännitteen aiheuttama sähkövirta suljetussa virtapiirissä voidaan havaita ampeerimittarilla. Syntynyttä sähkövirtaa nimitetään induktiovirraksi.

Sähkömagneettinen induktio
Kun johdin on muuttuvassa magneettikentässä, siihen indusoituu jännite. Tämä aiheuttaa suljettuun virtapiiriin sähkövirran (induktiovirran). Ilmiötä kutsutaan sähkömagneettiseksi induktioksi.



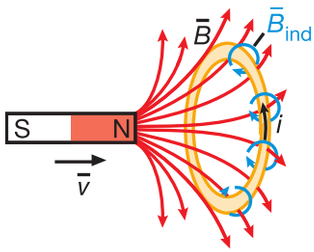
Oppilastyö ▪ Induktiovirran suunta

Aseta vapaasti liikkumaan pääsevä alumiinirengas riippumaan.

1. Vie voimakas tankomagneetti nopeasti alumiinirenkaan sisälle. Tarkkaile alumiinirengasta. Käännä magneetti toisinpäin ja toista koe.

2. Vedä alumiinirenkaan sisällä oleva tankomagneetti nopeasti ulos. Tarkkaile alumiinirengasta. Käännä magneetti toisinpäin ja toista koe.

Kun oppilastyössä tankomagneetti vietiin nopeasti alumiinirenkaan sisälle, magneettikenttä alumiinirenkaan lähellä muuttui ja renkaaseen indusoitui jännite. Induktiojännite aiheuttaa renkaaseen **induktiovirran *i***, joka synnyttää renkaan ympärille magneettikentän. Vaikka tankomagneetti ei koskettanut alumiinirengasta, rengas heilahti poispäin.



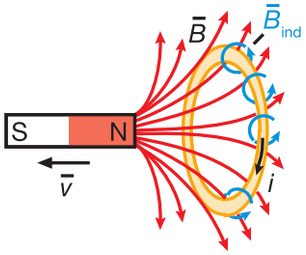
Tankomagneetti liikkuu johdinsilmukkaa kohti.

Kun alumiinirenkaaseen indusoituu sähkövirta, se synnyttää renkaan ympärille magneettikentän $\overline{B}_{ind}$. Rengas on kuin magneetti, eli sillä on kaksi eri kohtiota. Kun tankomagneetti lähestyy rengasta, niillä on samannimiset kohtiot eli N-kohtiot vastakkain. Ilmiössä on siis kyse kahden magneetin välisestä vuorovaikutuksesta; alumiinirenkaaseen kohdistuu kestomagneetista poispäin suuntautuva magneettinen voima. Kestomagneetin magneettikenttä $\overline{B}$ ja renkaan induktiovirran synnyttämä magneettikenttä $\overline{B}_{ind}$ ovat renkaan sisällä suunnaltaan vastakkaiset.

Induktiovirran suunnan voi päätellä oikean käden säännön avulla. Kun peukalo asetetaan alumiinirenkaan sisällä olevan indusoituneen magneettikentän suuntaan (piirroksessa vasemmalle), sormet osoittavat induktiovirran suunnan silmukassa: sähkövirran suunta on silmukan etureunassa ylöspäin. Alumiinirengas hylkii kestomagneettia, liikutettiinpa magneettia N- tai S-kohtio edellä kohti alumiinirengasta.

Magneettikentän muutoksen esimerkiksi silmukan tai alumiinirenkaan suhteen voi aiheuttaa liikkuva magneetti, renkaan tai silmukan liike magneettikentässä, magneettikentän voimakkuuden muuttuminen tai muuttuva sähkövirta.

Kun oppilastyön toisessa osassa tankomagneetti vedettiin ulos alumiinirenkaasta, rengas heilahti magneetin liikkeen suuntaan eli kes-



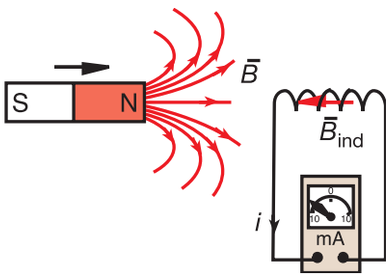
Tankomagneetti liikkuu johdinsilmukasta poispäin.

tomagneettiin päin. Kuten edellä, rengas on kuin magneetti; nyt tankomagneetin ja alumiinirenkaan erinimiset kohtiot eli N- ja S-kohtiot ovat vastakkain ja magneettien välillä on vetovoima. Induktiovirran synnyttämä magneettikenttä $\overline{B}_{ind}$ renkaan sisällä on samansuuntainen kestomagneetin kentän $\overline{B}$ kanssa.

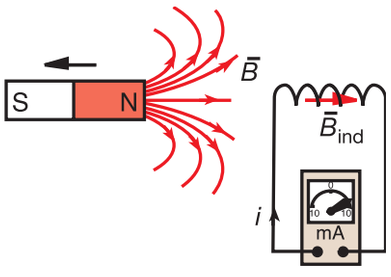
Alumiinirenkaassa kulkevan induktiovirran suunta voidaan päätellä oikean käden säännön avulla. Kun peukalo asetetaan alumiinirenkaan sisällä olevan magneettikentän suuntaan (piirroksessa oikealle), sormet osoittavat induktiovirran suunnan: nyt induktiovirran suunta on silmukan etureunassa alas. Induktiovirran aiheuttama kenttä pyrkii estämään magneetin liikkeen alumiinirenkaan tai käämin suhteen.

Induktiovirran suunta noudattaa Lenzin lakia. *Heinrich Lenz* (1804–1865) oli venäläinen fyysikko.

Lenzin laki
Induktiovirta on suunnaltaan sellainen, että sen vaikutukset vastustavat magneettikentän muutosta, josta induktio aiheutuu.



Oppilastyössä (sivu 55) todettiin, että kun kestomagneetti työnnetään käämin sisään, käämiin indusoituu sähkövirta. Lenzin lain mukaan induktiovirran aiheuttama magneettikenttä $\overline{B}_{ind}$ vastustaa kestomagneetin liikuttamisesta johtuvaa magneettikentän muutosta ja kestomagneetin kentän kasvua käämin sisällä. Induktion seurauksena syntynyt magneettikenttä $\overline{B}_{ind}$ on vastakkaissuuntainen kestomagneetin kenttään $\overline{B}$ nähden.



Kun kestomagneetti vedetään ulos käämistä, induktiovirta synnyttää magneettikentän, joka pyrkii vastustamaan kentän heikkenemistä, ja induktiokentän $\overline{B}_{ind}$ suunta on sama kuin kestomagneetin kentän $\overline{B}$ suunta. Tankomagneetin vieminen käämin sisään aiheuttaa käämissä vastakkaissuuntaisen sähkövirran kuin tankomagneetin pois vetäminen.

Lenzin lain mukaan
– heikkenevä ulkoinen magneettikenttä synnyttää induktiovirran, joka synnyttää alkuperäisen, ulkoisen magneettikentän suuntaisen kentän, ja alkuperäinen kenttä vahvistuu
– vahvistuva ulkoinen magneettikenttä synnyttää induktiovirran, joka synnyttää alkuperäiselle, ulkoiselle magneettikentälle vastakkaissuuntaisen kentän, ja alkuperäinen kenttä heikkenee.

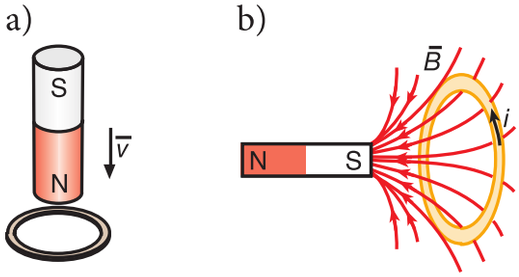
Pohdi ja etsi

2-1. Päättele, mikä on induktiovirran suunta, kun homogeeninen magneettikenttä a) vahvistuu b) heikkenee.

2-2. Päättele Lenzin lain perusteella, mikä on indusoituvan magneettikentän suunta, jos ulkoinen magneettikenttä
a) vahvistuu
b) heikkenee
c) pysyy muuttumattomana.

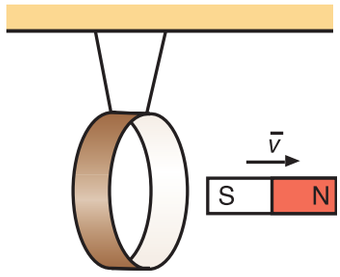
2-3. Pitävätkö seuraavat väitteet paikkansa?
a) Sähkömagneettisessa induktiossa muuttuva magneettikenttä synnyttää magneettikentässä olevaan suljettuun virtapiirin sähkövirran.
b) Muuttuva magneettikenttä voi synnyttää sähkökentän.
c) Lenzin lain mukaan sähkövirran vaikutukset pyrkivät hävittämään magneettikentän.

2-4. a) Mihin suuntaan sähkövirta kulkee johdinsilmukan etuosassa, kun sauvamagneetti putoaa kuvion mukaisesti silmukkaa kohti?

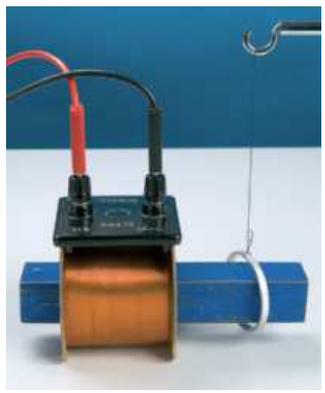


b) Päättele kestomagneetin liikkeen suunta.

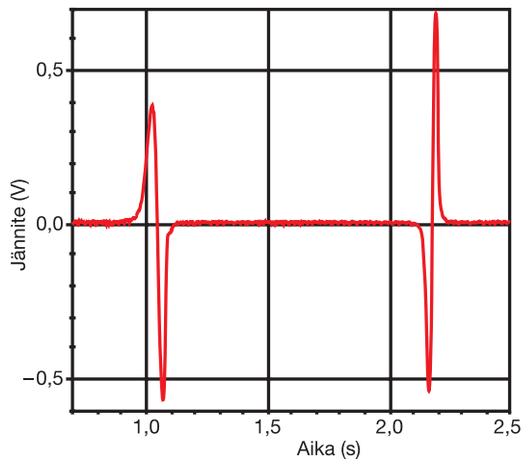
2-5. Sauvamagneetti vedetään pois langassa roikkuvan alumiinirenkaan läheltä.
a) Minkä suuntainen on renkaaseen indusoituva sähkövirta? Mihin suuntaan rengas heilahtaa?
b) Muuttuuko tilanne, jos sauvamagneetin asento muutetaan toiseksi (N-kohtio renkaan lähellä)?



2-6. Mitä vapaasti riippuvalle alumiinirenkaalle tapahtuu, kun käämiin kytketään sähkövirta?

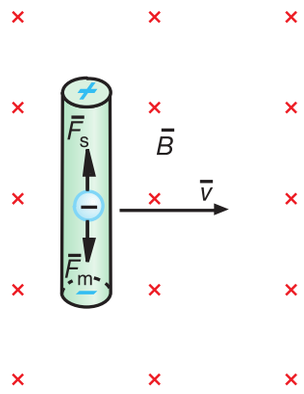


2-7. Kestomagneetti pudotettiin kahdesti käämin läpi. Tietokoneavusteisella mittausjärjestelmällä saatiin käämiin indusoituneelle jännitteelle oheinen kuvaaja. Kuvaile pudotuksissa olleita eroja kuvaajan perusteella.



2.2 Induktiolaki

Liikkuva suora johdin ulkoisessa magneettikentässä



Suoran johtimen elektroneihin vaikuttavat voimat, kun johdin liikkuu magneettikentässä, $\overline{v} \perp \overline{B}$.

Kun suora johdin liikkuu kuvan mukaisesti vakionopeudella kohtisuorasti ($\overline{v} \perp B$) homogeenista magneettikenttää vastaan, elektroneihin kohdistuu magneettinen voima $\overline{F}_m$, jonka suuruus on $F_m = qvB$. Negatiivisesti varattuihin hiukkasiin kohdistuvan magneettisen voiman suunta on oikean käden säännön mukaan kuvassa alaspäin. Tämän seurauksena osa vapaista elektroneista liikkuu johtimen alapäähän. Johtimen yläpäähän syntyy elektronien vajaus. Johtimeen muodostuu sähkökenttä, jonka suunta on kuvassa ylhäältä alas. Jäljelle jääneisiin elektroneihin kohdistuu sähköinen voima $\overline{F}_s$, jonka suuruus on $F_s = qE$. Sähkökentän voimakkuus kasvaa siirtyneiden elektronien lukumäärän kasvaessa. Sähkökentän ylläpitämiseen tarvitaan magneettinen voima. Lopulta saavutetaan tasapainotila, jossa elektroneihin kohdistuu yhtä suuret, mutta vastakkaissuuntaiset sähköinen ja magneettinen voima. Tällöin on voimassa ehto $F_m = F_s$ eli $qvB = qE$. Koska johdin liikkuu magneettikentässä, johtimen päiden välille indusoituu jännite. Tätä jännitettä kutsutaan lähdejännitteeksi ja merkitään kirjaimella e. Sähkökentän voimakkuuden suuruus johtimessa on $E = \frac{e}{l}$, jos johtimen pituus on l. Kun yhtälö $E = \frac{e}{l}$ sijoitetaan yhtälöön $qvB = qE$, saadaan $qvB = q\frac{e}{l}$ eli $e = lvB$.

$l \perp v \perp B$

Suoran johtimen induktiolaki
Kun suora johdin liikkuu vakionopeudella kohtisuorasti magneettikenttää vastaan, johtimen päiden välille indusoituu jännite (lähdejännite)

$$e = lvB,$$

jossa l on johtimen magneettikentässä olevan osan pituus, v johtimen nopeus ja B magneettivuon tiheyden suuruus.

Huomaa, että sähkömagneettisessa induktiossa lähdejännite e ja indusoitunut sähkövirta i kirjoitetaan pienillä kirjaimilla.

Esimerkki 1

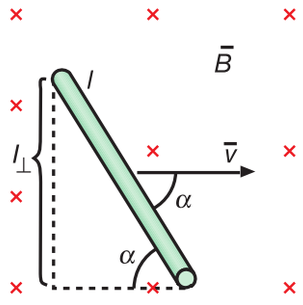
Metallisauvan pituus on 1,15 m. Sauva putoaa itä-länsisuunnassa, vaakasuorassa asennossa 4,5 m talon katolta maahan. Maan magneettivuon tiheyden vaakasuoran komponentin suuruus on 0,38 μT. Kuinka suuri jännite sauvaan on indusoitunut maahanosumishetkellä?

$l = 1{,}15\ \text{m}, \quad h = 4{,}5\ \text{m}, \quad B = 0{,}38\ \mu\text{T}, \quad g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$

Koska metallisauva putoaa kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, putoavan sauvan päiden välille indusoituu jännite $e = lvB$. Jos sauvaan kohdistuva ilmanvastus oletetaan pieneksi, sauvan nopeus maahanosumishetkellä saadaan määritettyä mekaanisen energian säilymisen perusteella. Sauvan potentiaalienergia muuntuu liike-energiaksi, ja yhtälöstä $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ sauvan nopeudeksi saadaan $v = \sqrt{2gh}$. Kun sauva saavuttaa maanpinnan, siihen on indusoitunut jännite

$$\begin{aligned} e &= lvB = l\sqrt{2gh} \cdot B \\ &= 1{,}15\ \text{m} \cdot \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \text{m/s}^2 \cdot 4{,}5\ \text{m}} \cdot 0{,}38\ \mu\text{T} \approx 4{,}1\ \mu\text{V}. \end{aligned}$$

Sauvan osuessa maahan sen päihin on indusoitunut 4,1 μV:n jännite.



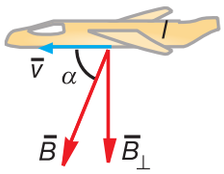
$e = l_\perp vB = l \sin\alpha \cdot vB = lvB \sin\alpha$

Suora virtajohdin voi liikkua magneettikentän normaalitasossa niin, että **johtimen suunta ja nopeus eivät** ole **kohtisuorassa toisiaan vastaan**. Tällöin on otettava huomioon johtimen **pituuden nopeuden suuntaa vastaan kohtisuora projektio** ($l_\perp$). Samoin menetellään, jos nopeus ei ole kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, eli otetaan huomioon nopeutta vastaan kohtisuorassa oleva magneettivuon tiheyden komponentti.

Esimerkki 2

Hävittäjälentokone lentää vaakasuoraan etelästä pohjoiseen vakionopeudella 1,8 M (mach) eli 1,8 kertaa äänen nopeudella. Koneen siipien kärkiväli on 11,4 m. Maan magneettikentän magneettivuon tiheys tällä alueella on 45 μT. Kenttä suuntautuu vinosti alaspäin ja muodostaa 67°:n kulman koneen nopeuden kanssa.
a) Kuinka suuri jännite indusoituu koneen siivenkärkien välille?
b) Kumpi siivenkärjistä varautuu negatiivisesti?

$v = 1{,}8 \cdot 343$ m/s (+20 °C), $l = 11{,}4$ m, $B = 45\ \mu$T,
$\alpha = 67°$, $g = 9{,}81$ m/s^2



$\vec{v} \perp \vec{B}_\perp$ ja $\vec{v} \perp \vec{l}$

a) Lentokoneen siivet ovat kohtisuorassa nopeutta $\vec{v}$ vastaan, mutta koska lentokoneen nopeuden $\vec{v}$ ja magneettikentän $\vec{B}$ välinen kulma on 67°, ehto $\vec{v} \perp \vec{B}$ ei ole voimassa. Koneen nopeutta vastaan kohtisuorassa oleva magneettivuon tiheyden komponentti on $B_\perp = B\sin\alpha$. Indusoitunut jännite on

$$e = lvB_\perp = lvB\sin\alpha$$
$$= 11{,}4\ \text{m} \cdot 1{,}8 \cdot 343\ \text{m/s} \cdot 45\ \mu\text{T} \cdot \sin 67° \approx 0{,}29\ \text{V}.$$

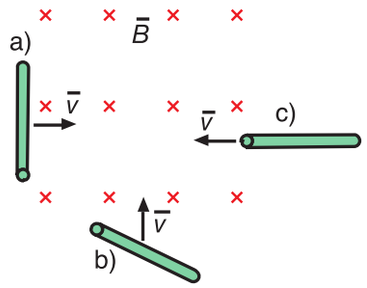
Siivenkärkien välille indusoitunut jännite on 0,29 V.

b) Kun koneen etenemissuunta on etelästä pohjoiseen, koneen siivet ovat itä-länsisuunnassa. Oikean käden säännön perusteella itään osoittavan siiven kärki varautuu negatiivisesti.

Lentokone lentää maan magneettikentässä. Indusoituuko siipien kärkien välille aina jännite?

Pohdi ja etsi

2-8. Johdin tulee vakionopeudella homogeeniseen magneettikenttään. Indusoituuko johtimeen jännite tapauksissa a–c?



2-9. Missä asennossa lentokoneen pitäisi lentää, jotta siipien kärkien välillä indusoituisi mahdollisimman a) suuri jännite b) pieni jännite?

2-10. Voiko junan pyörien välisen metalliakselin päiden välille indusoitua jännite, jos juna lähtee
a) Tampereelta Poriin (länteen)
b) Tampereelta Jyväskylään (koilliseen)
c) Nairobista Mombasaan (kaakkoon)?

Tehtäviä

2-11. Kanadan pohjoisosassa sijaitsevan magneettisen navan alueella Maan magneettikentän suunta on pystysuoraan alaspäin. Lentokone, jonka siivenkärkien väli on 25 m, lentää navan yli vaakasuoraan nopeudella 680 km/h. Oletetaan, että lentokorkeudella magneettivuon tiheys on 85 μT. Kuinka suuri on tällöin siivenkärkien välinen jännite, ja kumpi kärki on korkeammassa potentiaalissa? [K2001, 8 (osa)]

2-12. Vaakasuoraan lentävän lentokoneen nopeus on 175 m/s. Maan magneettikentän magneettivuon tiheys on 30 μT. Kenttä muodostaa 25°:n kulman pystysuunnan kanssa. Lentokoneen metallisiipien kärkien väli on 35 m. Piirrä kuva tilanteesta ja laske siivenkärkien välille indusoituva jännite.

2-13. Homogeenisessa magneettikentässä liikkuvaan suoraan antenniin indusoituu 2,5 μV:n jännite. Antenni muodostaa kulman α nopeuden suunnan kanssa. Antenni, jonka pituus on 75 cm, liikkuu vakionopeudella 12,4 m/s. Magneettivuon tiheys on 15 μT ja suunta kohtisuorasti antennia ja sen nopeutta vastaan. Laske kulman α suuruus.

2-14. Tiepalveluauto ajaa nopeudella 95 km/h Tampereelta suoraan länteen. Kuinka suuri jännite syntyy auton 1,5 m pitkän pystysuoran antennin päiden välille, kun Maan magneettikentän magneettivuon tiheys on 54 μT ja inklinaatio 72°? Deklinaatio voidaan olettaa nollaksi. Kumpi antennin pää on korkeammassa potentiaalissa? [K2007, 8]

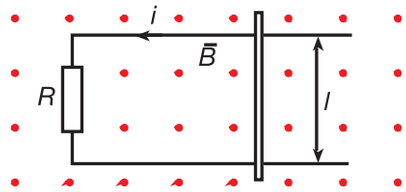
2-15. Suora johdintanko liikkuu nopeudella 2,4 m/s kohtisuorasti magneettikenttää vastaan. Tangon pituus on 0,12 m ja magneettivuon tiheyden suuruus 0,10 mT. Tangon päät yhdistetään johtimella. Piirin kokonaisresistanssi on 0,20 Ω, ja yhdysjohdin kulkee magneettikentän ulkopuolella. Laske piirissä kulkeva sähkövirta.

2-16. Kaksi suoraa yhdensuuntaista johdinta, joiden välimatka on 84 mm, on yhdistetty vastuksella, jonka resistanssi on 1,8 Ω. Homogeeninen magneettikenttä, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 1,35 T, on kohtisuorassa johtimia vastaan. Metallisauvaa vedetään johtimia pitkin kuvion mukaisesti, jolloin piiriin indusoituu 81 mA:n sähkövirta. Sauvan nopeus on vakio.

a) Mihin suuntaan sauva liikkuu?

b) Kuinka suuri on sauvan nopeus?

c) Kuinka suurella johtimien suuntaisella voimalla sauvaa on vedettävä, kun sauvaan kohdistuva kitka on 12 mN?

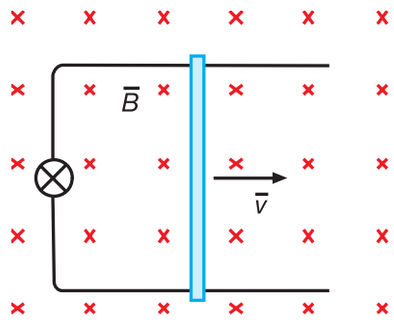


2-17. Metallisauva liikkuu vakionopeudella lähes kitkattomasti kahta suoraa yhdensuuntaista johdinta pitkin kuvan mukaisesti. Polttimossa on merkintä 4,5 V/1,5 W, ja sauvan johtimien välissä olevan osan pituus on 12 cm. Magneettivuon tiheyden suuruus on 0,15 T.

a) Kuinka suurella nopeudella sauvan on liikuttava, jotta polttimo hehkuisi kirkkaasti?

b) Kuinka suuri vetävä voima tähän tarvitaan?

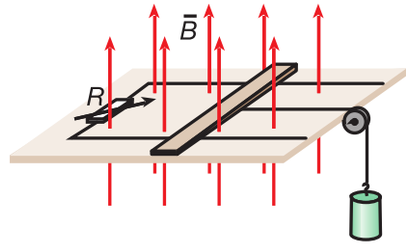
c) Mihin suuntaan sähkövirta kulkee sauvassa?



2-18. Oheisen kuvan esittämässä systeemissä 0,25 kg:n punnuksen halutaan laskeutuvan vakionopeudella 5,0 m/s. Vaakasuorilla kuparikiskoilla (lähes) kitkatta liukuva johdesauva on yhdistetty kuormaan langalla, joka kulkee herkkäliikkeisen pyörän yli. Pystysuoran homogeenisen magneettikentän magneettivuon tiheys on 0,22 T ja kiskojen välinen etäisyys 1,5 m.

a) Kuinka suureksi on säätövastuksen resistanssi valittava?

b) Kuinka paljon energiaa vapautuu vastuksessa kuorman liikkuessa 0,60 m?



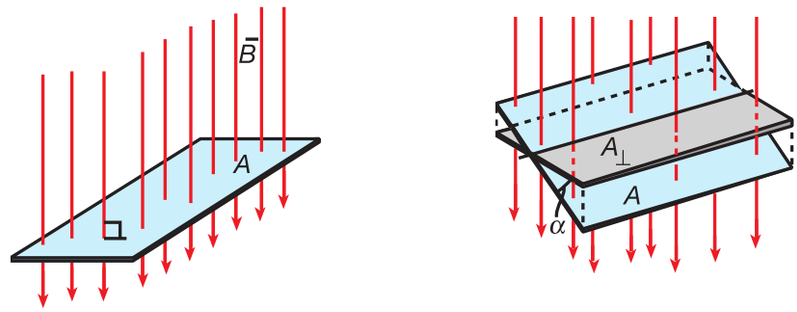
Johdinsilmukka ulkoisessa magneettikentässä

Aikaisemmin totesimme, miten virtasilmukan läpäisevä muuttuva magneettikenttä voi synnyttää silmukkaan sähkövirran. Silmukan läpäisevän magneettikentän määrää kuvaa suure **magneettivuo.**

Magneettivuo
Magneettivuon Φ määrittelee yhtälö

$$\Phi = AB,$$

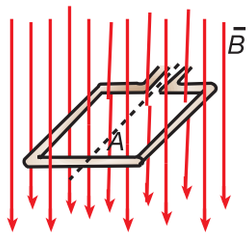
jossa A on kenttää vastaan kohtisuora pinta-ala ja B magneettivuon tiheyden suuruus.



Jos pinta A ei ole kohtisuorassa magneettikentän kenttäviivoja vastaan, magneettivuota laskettaessa on **käytettävä pinnan** magneettikenttää vastaan **kohtisuoraa** projektiota $A_\perp$. Magneettivuo saa suurimman arvonsa, kun pinta A on kohtisuorassa kenttäviivoja vastaan. Magneettivuo on nolla, kun pinta on kenttäviivojen suuntainen.

Magneettivuon yksikkö SI-järjestelmässä on
$[\Phi] = [A][B] = 1\ \text{m}^2 \cdot 1\ \text{T} = 1\ \text{Tm}^2 = 1\ \text{Wb}$ (weber). *Wilhelm Weber* (1804–1891) oli saksalainen fyysikko.

Esimerkki 3



Neliön muotoinen silmukka on kuvan mukaisesti kohtisuorassa sellaista homogeenista magneettikenttää vastaan, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 0,22 mT. Neliön sivun pituus on 4,9 cm. Silmukka voi pyöriä akselinsa ympäri. Laske magneettivuo silmukan läpi, kun silmukka on

a) kuvan asennossa

b) kääntynyt 30° alkuasentoonsa nähden

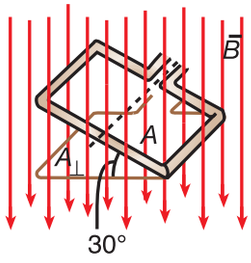
c) kääntynyt 90° alkuasentoonsa nähden.

$a = 0{,}049\ \text{m}, \quad B = 0{,}22\ \text{mT}$

a) Alussa silmukan taso on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, pinta-ala on $A = a^2 = (0{,}049\ \text{m})^2$. Magneettivuo silmukan läpi on

$$\Phi = AB = (0{,}049\ \text{m})^2 \cdot 0{,}22\ \text{mT} \approx 0{,}53\ \mu\text{Wb}.$$

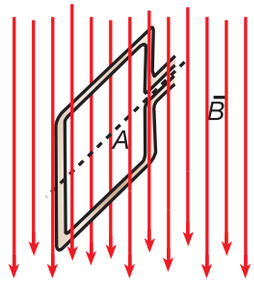
Magneettivuo on 0,53 μWb.



b) Kun silmukka on kääntynyt 30°, magneettivuo silmukan läpi on

$$\Phi = A_\perp B = A\cos\alpha \cdot B = AB\cos\alpha$$
$$= (0{,}049\ \text{m})^2 \cdot 0{,}22\ \text{mT} \cdot \cos 30^\circ \approx 0{,}46\ \mu\text{Wb}.$$

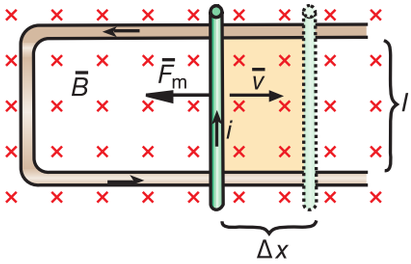
Magneettivuo on 0,46 μWb.



c) Kun silmukka on kääntynyt 90°, magneettivuo silmukan läpi on

$$\Phi = A_\perp B = AB\cos\alpha$$
$$= (0{,}049\ \text{m})^2 \cdot 0{,}22\ \text{mT} \cdot \cos 90^\circ = 0\ \text{Wb}.$$

Magneettivuo on 0 Wb.



Johtimen liikkuessa magneettivuo silmukan läpi kasvaa, koska silmukan pinta-ala kasvaa. Johtimeen indusoituu jännite ja suljettuun virtapiiriin sähkövirta.

Viereisessä kuvassa kahden yhdensuuntaisen johdinkiskon päällä on sähköjohdin. Homogeeninen magneettikenttä on kohtisuorassa kiskojen ja johtimen määrittelemää tasoa vastaan. Johdinkiskojen välissä olevan johtimen pituus on l. Johdinta liikutetaan kiskoja pitkin vakionopeudella $\overline{v}$. Tällöin johdin kulkee ajassa t matkan $\Delta x = v\Delta t$. Silmukan pinta-alan muutos on $\Delta A = l\Delta x = lv\Delta t$. Magneettivuon muutos on $\Delta\Phi = B\Delta A = Blv\Delta t = e\Delta t$. Magneettivuon muutos aiheuttaa induktiojännitteen $e = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Lenzin lain mukaan magneettinen voima vastustaa johtimen liikettä, joten voima on liikkeen suunnalle vastakkainen. Kun johdin liikkuu oikealle, magneettivuo kasvaa ja johtimeen kohdistuva magneettinen voima suuntautuu vasemmalle. Oikean käden säännön mukaan induktiovirran i suunta kuvan liikkuvassa johtimessa on ylöspäin.

Silmukkaan indusoitunut keskimääräinen jännite riippuu magneettivuon muutosnopeudesta. Indusoituneen jännitteen synnyttämän induktiovirran aiheuttama magneettikenttä pyrkii vastustamaan magneettivuon muutosta. Tämä ilmaistaan indusoituneen jännitteen yhtälössä miinusmerkillä.

Induktiolaki

Kun magneettivuo johdinsilmukan läpi muuttuu, silmukkaan indusoituu keskimääräinen induktiojännite (lähdejännite)

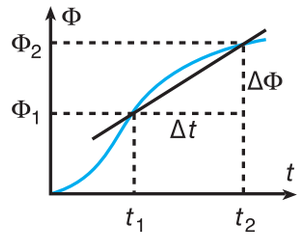
$$e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

jossa $\Delta\Phi$ on magneettivuon muutos ja Δt vuon muutokseen kulunut aika.

Induktiojännite on yhtä suuri kuin magneettivuon muutosnopeus, mutta vastakkaissuuntainen. Induktiojännitteen suunta on sellainen, että se vastustaa magneettivuon muutosta.

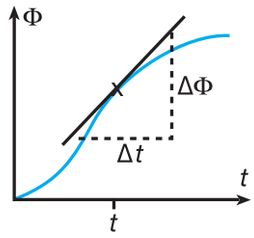
Yleisessä muodossa induktiolaki tunnetaan Faradayn lakina:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$



Keskimääräinen indusoitunut jännite aikavälillä t_1 … t_2 on

$e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

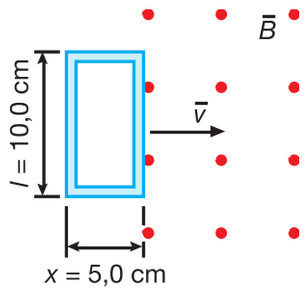


Hetkellinen indusoitunut jännite hetkellä t on käyrän tangentin fysikaalinen kulmakerroin

$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Induktiolaki on johdettu yhdelle johdinsilmukalle. Käämissä ilmiö havaitaan moninkertaisena. Käämiin indusoitunut keskimääräinen jännite on $e_k = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, kun käämissä on N johdinsilmukkaa.

Esimerkki 4



Johdinsilmukkaa vedetään kohtisuorasti magneettikenttää vastaan vakionopeudella 5,0 cm/s. Silmukan resistanssi on 0,040 Ω ja magneettivuon tiheyden suuruus 0,20 mT. Alkutilanne on kuvan mukainen, ja kenttä jatkuu samanlaisena oikealle mentäessä.

a) Määritä magneettivuo ajan funktiona.

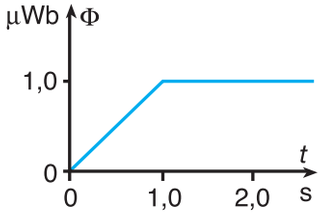
b) Määritä indusoitunut keskimääräinen jännite ajan funktiona.

c) Kuinka suurella voimalla silmukkaa on vedettävä, jotta sen nopeus pysyisi vakiona?

$v = 5{,}0$ cm/s, $B = 0{,}20$ mT, $x = 5{,}0$ cm,
$l = 10{,}0$ cm, $R = 0{,}040\ \Omega$

a) Johdinsilmukka on kokonaan magneettikentässä ajan

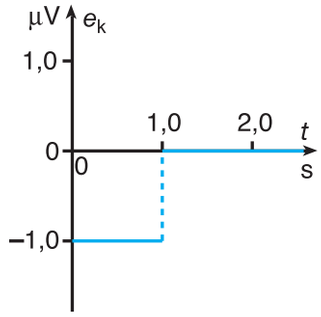
$$t = \frac{x}{v} = \frac{5{,}0\text{ cm}}{5{,}0\text{ cm/s}} = 1{,}0\text{ s}$$ kuluttua.



Aikavälillä 0,0 s ... 1,0 s magneettivuo kasvaa tasaisesti ja on verrannollinen silmukan magneettikentässä olevaan pinta-alaan. Magneettivuo hetkellä 1,0 s on

$$\Phi = AB = lxB = lvtB$$
$$= 0{,}100\text{ m} \cdot 0{,}050\text{ m/s} \cdot 1{,}0\text{ s} \cdot 0{,}20\text{ mT} = 1{,}0\ \mu\text{Wb}.$$

Hetkestä $t = 1{,}0$ s alkaen magneettivuo pysyy muuttumattomana, koska silmukan magneettikentässä oleva pinta-ala ei muutu.

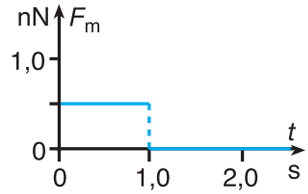


b) Aikavälillä 0,0 s ... 1,0 s magneettivuo muuttuu tasaisesti, joten indusoituva keskimääräinen jännite on vakio:

$$e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{1{,}0\,\mu\text{Wb} - 0{,}0\,\mu\text{Wb}}{1{,}0\text{ s}} = -1{,}0\,\mu\text{V}.$$

Hetkestä $t = 1{,}0$ s alkaen magneettivuo ei muutu, ja siksi indusoitunut jännite on nolla.

c) Silmukan etureunaan vaikuttava magneettisen voiman suuruus on $F_m = ilB$, jossa l on kenttään tulevan silmukan etureunan pituus.



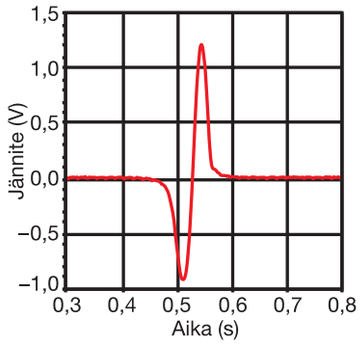
Aikavälillä 0,0 s ... 1,0 s magneettisen voiman suuruus on

$$F_m = ilB = \frac{e}{R}lB = \frac{1{,}0\,\mu\text{V}}{0{,}040\,\Omega} \cdot 0{,}100\text{ m} \cdot 0{,}20\text{ mT} \approx 0{,}50\text{ nN}.$$

Jotta silmukan nopeus pysyisi vakiona, silmukkaa on vedettävä 0,50 nN:n vakiovoimalla, joka on vastakkaissuuntainen ja yhtä suuri kuin magneettinen voima.

Hetkestä $t = 1{,}0$ s alkaen magneettivuo ei muutu, joten silmukkaan ei indusoidu sähkövirtaa. Voima on nolla.

Esimerkki 5



Oppilastyössä sivulla 55 tutkittiin käämiin indusoitunutta jännitettä, kun kestomagneetti pudotettiin käämin läpi.
a) Selitä jännitekuvaajan muoto.
b) Miten kuvaajan muoto muuttuu, jos magneetti pudotetaan toinen pää edellä?
c) Miksi jälkimmäinen piikki on korkeampi?

a) Kun kestomagneetti putoaa käämin läpi, magneettivuon muuttuminen käämin sisällä synnyttää käämin päiden välille induktiolain mukaisen induktiojännitteen $e = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$.

Magneetin pudotessa ja lähestyessä käämiä magneettivuon muutosnopeus $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ kasvaa ja on positiivinen – tällöin negatiivinen jännite kasvaa. Kun magneetti menee käämin sisään, vuo kasvaa edelleen, mutta vuon muutosnopeus alkaa pienentyä, joten negatiivinen jännite pienenee. Kun magneetti on keskellä käämiä, magneettivuo on suurimmillaan. Vuon muutosnopeus ja indusoitunut jännite ovat sillä hetkellä nollia.

Kun magneetti jatkaa putoamistaan, magneettivuon muutosnopeus $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ on negatiivinen ja sen itseisarvo kasvaa. Indusoitunut jännite on silloin positiivinen. Vuon muutosnopeus jatkaa kasvamistaan, kunnes magneetti on kokonaan poistunut käämin sisältä. Tämän jälkeen vuon muutosnopeus alkaa pienentyä, ja samalla jännite pienenee ja saavuttaa lopulta arvon nolla.

b) Jos magneetti pudotetaan toinen pää edellä, putoavan magneetin magneettikentän suunta vaihtuu päinvastaiseksi, jolloin myös indusoituvan jännitteen suunta käämissä vaihtuu päinvastaiseksi. Kuvassa piikkien paikat peilautuvat aika-akselin suhteen.

c) Magneetin pudotessa sen vauhti kasvaa koko ajan: magneetin vauhti on käämin alaosassa suurempi kuin yläosassa. Näin ollen käämin ohitusaika lyhenee ja magneettivuon muutosnopeuden itseisarvo kasvaa, joten indusoituva jännite on suurempi. Siksi jälkimmäinen piikki on korkeampi ja indusoitunut jännite suurempi.

Pohdi ja etsi

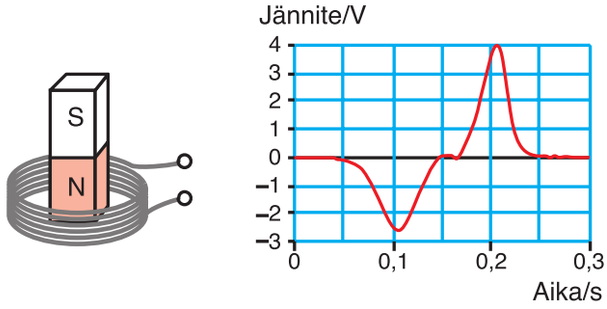
2-19. Millä eri tavoilla ulkoisen magneettikentän magneettivuo johdinsilmukan läpi voi muuttua?

2-20. Mihin asentoon metallirengas tulisi asettaa homogeenisessa magneettikentässä, jotta magneettivuo renkaan läpi olisi mahdollisimman a) suuri b) pieni?

2-21. a) Neliön muotoinen johdinsilmukka liikkuu homogeenisessa magneettikentässä vakionopeudella asentonsa säilyttäen. Miksi johdinsilmukkaan ei synny jatkuvaa sähkövirtaa?
b) Mitkä seikat vaikuttavat magneettikentässä liikkuvaan johdinsilmukkaan indusoituneen jännitteen suuruuteen?

2-22. Pitävätkö seuraavat väitteet paikkansa?
a) Muuttumattomana pysyvä magneettikenttä aiheuttaa käämiin jännitteen.
b) Kun johdinsilmukan läpäisevä magneettivuo muuttuu, silmukkaan indusoituvan jännitteen suuruus riippuu magneettivuon muutosnopeudesta.
c) Kestomagneetti pudotetaan käämin läpi. Mitä korkeammalta käämi pudotetaan, sitä suurempi on käämiin indusoituva jännite.

2-23. Kun tankomagneetti pudotettiin kuvan mukaisesti käämin läpi, mitattiin tietokoneeseen kytketyllä jänniteanturilla käämin navoista alla olevan kuvaajan mukainen jännite. Selitä jännitekuvaajan muoto. [S2000, 8 (osa)]



2-24. Oppilastyössä oppilaat kytkivät käämit sarjaan ja ampeerimittarin virtapiiriin. He pudottivat kestomagneetin vuorotellen jokaisen käämin läpi samalta korkeudelta. Käämien kierrosmäärät eroavat toisistaan.
a) Miten käämin kierrosmäärä vaikuttaa ampeerimittarin lukemaan?
b) Miten kestomagneetin pudotuskorkeus vaikuttaa mittarin lukemaan?

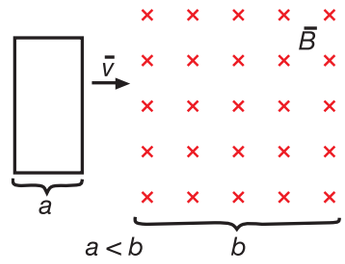
Tehtäviä

2-25. Metallisilmukka on ympyrän muotoinen, ja sen säde on 18 cm. Silmukka on homogeenisessa magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheyden suuruus on 720 mT.
a) Laske magneettivuo silmukan läpi, kun silmukan taso on kohtisuorassa magneettikentän kenttäviivoja vastaan.
b) Laske silmukan läpäisevä magneettivuo, kun silmukkaa kallistetaan kohdassa a mainitusta asennosta 25°.
c) Muuttuvatko kohtien a ja b tulokset, jos silmukan muoto muutetaan neliöksi?

2-26. a) Käämissä on 250 johdinkierrosta. Magneettivuon suuruus käämin läpi muuttuu tasaisesti 0,26 sekunnissa arvosta 36 mWb arvoon 12 mWb. Laske käämin napojen välille indusoituva jännite.
b) Homogeeninen magneettikenttä on kohtisuorassa johdinsilmukan tasoa vastaan. Sen magneettivuon tiheyden suuruus on 27 mT. Silmukan pinta-ala on 51 cm^2 ja resistanssi 0,98 Ω. Silmukkaa kierretään tasaisella nopeudella 0,17 sekunnissa siten, että sen taso tulee magneettikentän suuntaiseksi. Kuinka suuri keskimääräinen sähkövirta silmukassa kulkee?

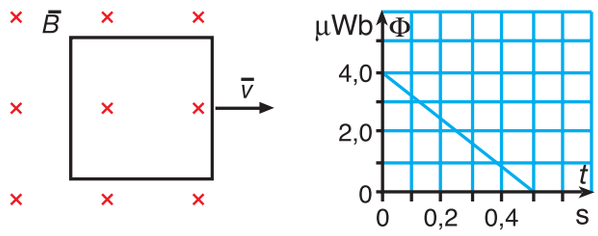
2-27. Sotilasalue, jonka mitat ovat 30,0 km × 30,0 km, on aidattu yhtenäisellä piikkilankaaidalla. Maan magneettikentän magneettivuon tiheyden keskimääräinen arvo maanpintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on tuolla alueella 52 μT.
a) Kuinka suuri jännite havaitaan aidassa olevan avoimen portin portinpylväiden välissä magneettisen myrskyn aikana, jolloin Maan magneettikentän magneettivuon tiheyden pystykomponentti muuttuu 1,0 % 20,0 sekunnin aikana?
b) Kuinka suuri virta kulkee langassa, kun portti suljetaan? Langan halkaisija on 3,0 mm ja resistiivisyys 0,180 μΩm. [TKK 2002]

2-28. Suljettu johdinsilmukka kulkee vakionopeudella magneettikentän läpi kuvion mukaisesti. Esitä pääpiirteissään
a) silmukan magneettivuo ajan funktiona
b) silmukkaan indusoituva jännite ajan funktiona
c) silmukassa kulkeva induktiovirta ajan funktiona.



2-29. Määritä kuvaajan avulla johdinsilmukkaan indusoitunut a) keskimääräinen jännite aikavälillä 1,0 s ... 3,0 s b) hetkellinen jännite hetkellä 2,0 s.

2-30. Neliön muotoisen johdinsilmukan sivun pituus on 8,0 cm. Johdinsilmukkaa vedetään pois homogeenisesta magneettikentästä kohtisuorasti magneettikenttää vastaan. Kuvaaja esittää magneettivuota silmukan läpi (t, Φ)-koordinaatistossa. Silmukan resistanssi on 1,5 mΩ.
a) Laske indusoitunut jännite aikavälillä 0,0 s ... 0,50 s.
b) Laske sähkövirta hetkellä $t = 0{,}20$ s.
c) Kuinka suurella voimalla silmukkaa on vedettävä magneettikentästä?



2.3 Itseinduktio ja magneettikentän energia

Itseinduktio

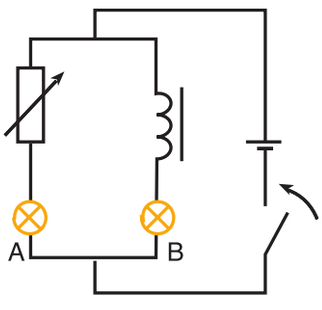
Oppilastyö ▪ Itseinduktio

1. Rakenna kuvan mukainen kytkentä rautasydämisestä käämistä, säätövastuksesta ja kahdesta lampusta. Säädä lamput ensin yhtä kirkkaiksi. Tarkkaile lamppujen syttymistä virtapiiriä suljettaessa ja avattaessa. Kokeile kytkentää myös ilman rautasydäntä.

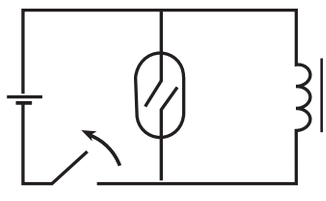
2. Kytke rautasydämellä varustettu käämi 4,5 V:n paristoon. Irrota käämistä paristoon tuleva johdin ja kytke se takaisin paristoon. Mitä havaitset?

3. Kytke hohtolamppu 4,5 V:n paristoon. Tarkkaile hohtolamppua virrankatkaisuhetkellä.

Kytke hohtolamppu rautasydämellä varustetun käämin rinnalle. Yhdistä navat 4,5 V:n paristoon. Tarkkaile hohtolamppua virrankatkaisuhetkellä.



1



3

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa lamput syttyivät virtapiiriä suljettaessa eri aikaan. Lamppu A syttyi heti virtapiirin sulkemisen jälkeen, kun taas käämin puoleinen lamppu B syttyi vasta hetken kuluttua. Oppilastyössä havaittiin myös, että rautasydämen lisääminen viivästytti lampun B syttymistä.

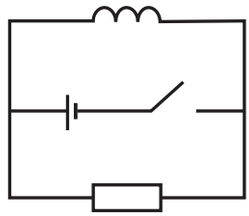
Kun oppilastyön kohdassa 2 käämistä tuleva johdin irrotettiin paristosta, havaittiin pieni kipinä, ns. katkaisukipinä. Oppilastyön kolmannessa kohdassa hohtolamppu ei syttynyt, kun se kytkettiin suoraan 4,5 V:n paristoon. Hohtolampun syttymisjännite on noin 100 V. Kun hohtolamppu kytkettiin käämin rinnalle ja virtapiiri avattiin, hohtolamppu välähti. Kun käämissä kulkeva sähkövirta katkaistaan, käämin magneettikenttä alkaa nopeasti heiketä: käämi on muuttuvassa magneettikentässään. Tämän seurauksena käämiin syntyy **itseinduktiojännite**, joka pyrkii vastustamaan muutosta eli ylläpitämään sähkövirtaa. Itseinduktiojännitteen napaisuus on nyt sama kuin alkuperäisen jännitteen napaisuus. Sähkövirta ei siis katkea heti, kun virtapiiri katkaistaan. Koska katkaisuhetkellä sähkövirran ja samalla magneettivuon muutos voi olla nopea, indusoitunut jännite voi olla varsin suuri. Oppilastyössä hohtolamppu välähti, koska virtapiiriin syntyy katkaistaessa huomattavasti pariston lähdejännitettä suurempi jännite.

Itseinduktio
Itseinduktiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa johtimen muuttuva sähkövirta indusoi samaan johtimeen sähkövirran muutosta vastustavan jännitteen.

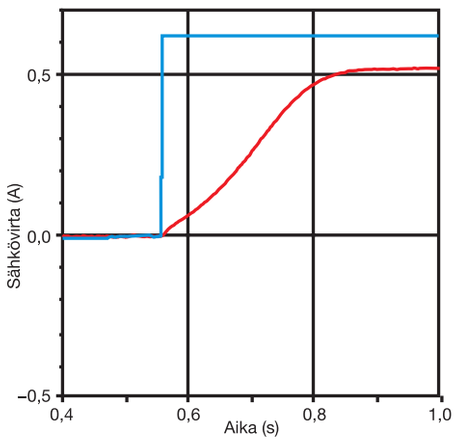
Kun pistotulppa vedetään irti pistorasiasta, irrotushetkellä voi havaita pienen sähköpurkauksen, katkaisukipinän.

1800-luvulla induktiota hyödynnettiin mm. kuvan laitteessa, jolla annettiin potilaalle sähköshokkeja. Shokkien uskottiin parantavan sairauksia.

Esimerkki 6



Oppilastyössä tutkittiin sähkövirran muuttumista käämissä virrankatkaisuhetkellä viereistä kytkentää käyttäen. Mittaustietokoneella saadussa kuvassa sininen käyrä on vastuksessa kulkeva sähkövirta ja punainen käämissä kulkeva sähkövirta. Selitä kuvaajan muoto.



Kuvaajan mukaan virtapiiri suljetaan hetkellä $t \approx 0{,}56$ s. Vastuksessa sähkövirta saavuttaa maksimiarvonsa välittömästi. Käämissä sähkövirta saavuttaa vasta jonkin ajan kuluttua lopullisen arvonsa. Kun käämiin kytketään jännite, käämin sähkövirta ja magneettivuo käämin läpi kasvavat. Sähkövuon kasvu aiheuttaa käämiin itseinduktiojännitteen, joka on vastakkaissuuntainen jännitelähteen jännitteelle. Siksi käämin sähkövirta kasvaa hitaammin kuin vastuksen sähkövirta. Kuvaajasta huomataan myös, että vastuksen resistanssi on hieman pienempi kuin käämin, koska virta vastuksessa on suurempi.

Itseinduktiojännitteen suuruus riippuu käämistä ja siinä kulkevan sähkövirran muutosnopeudesta. Sähkövirran kasvu aiheuttaa virran kasvua vastustavan itseinduktiojännitteen, ja sähkövirran pieneneminen aiheuttaa virtaa ylläpitävän itseinduktiojännitteen. Muuttuva sähkövirta muuttaa käämin magneettivuota. Käämiin indusoituu itseinduktiojännite, jonka suuruus saadaan induktiolaista. Itseinduktiojännite vastustaa sähkövirran muuttumista ja on suoraan verrannollinen virran muutosnopeuteen. Jos sähkövirran muutos tapahtuu hyvin nopeasti eli Δt on pieni, itseinduktiojännite voi olla hyvin suuri.

Itseinduktiojännite

Keskimääräinen induktiojännite aikavälillä Δt saadaan yhtälöstä

$$e_{\mathrm{k}} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},$$

jossa ΔI on sähkövirran muutos ja verrannollisuuskerroin L käämin induktanssi.

Induktanssi ilmaisee itseinduktioilmiön voimakkuuden eli käämin kyvyn vastustaa sähkövirran muutosta.

Induktanssin yksikkö on $[L] = \frac{[e][t]}{[I]} = \frac{1\,\text{V} \cdot 1\,\text{s}}{1\,\text{A}} = 1\,\text{H}$ (1 henry).

Joseph Henry (1797–1878) oli yhdysvaltalainen fyysikko.

Kun johtimessa kulkee sähkövirta, johtimen ympärillä on aina – johtimen muodosta riippumatta – magneettikenttä. Näin ollen sähkövirran muutos aiheuttaa jokaisessa virtapiirissä itseinduktiojännitteen. Virtapiirin induktanssi ei siis koskaan ole nolla. Sähkövirta ei saavuta suurinta arvoa heti sähkövirran kytkemisen jälkeen, ja vastaavasti sähkövirran kytkeminen pois päältä ei heti katkaise sähkövirtaa.

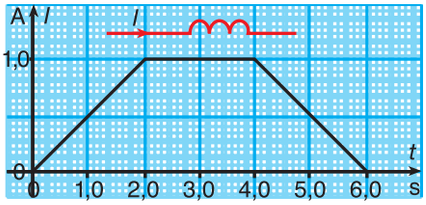
Kun virtapiirissä on käämi ja virtapiirin sähkövirta kasvaa, kasvu aiheuttaa sähkövirran kasvua vastustavan itseinduktiojännitteen. Tämä johtuu siitä, että sähkövirran kasvaessa magneettikenttä käämin ympärillä kasvaa. Käämin päiden välille indusoituu Lenzin lain mukaisesti itseinduktiojännite, joka pyrkii näin vastustamaan sähkövirran kasvua.

Jos taas sähkövirta virtapiirissä pienenee, tämä aiheuttaa sähkövirran pienenemistä vastustavan itseinduktiojännitteen. Tämä johtuu siitä, että sähkövirran pienentyessä magneettikenttä käämin ympärillä heikkenee ja käämiin indusoituu itseinduktiojännite, joka pyrkii ylläpitämään piirin sähkövirtaa.

Induktanssi on kullekin johtimelle tai laitteelle ominainen vakio, kuten resistanssi vastukselle ja kapasitanssi kondensaattorille. Käämin induktanssi riippuu käämin kierrosluvusta ja rakenteesta. Rautasydämisen käämin induktanssi on huomattavasti suurempi kuin pelkän käämin induktanssi. Käämin suurta induktanssia voidaan hyödyntää, kun tarvitaan suurta jännitepiikkiä, kuten esimerkiksi auton moottorin sytytysjärjestelmässä. Toisaalta käämissä tapahtuva itseinduktio myös tasoittaa virtapiirissä tapahtuvia sähkövirran muutoksia. Itseinduktiojännite voi aiheuttaa virtapiirin avaamishetkellä katkaisijassa haitallista kipinöintiä. Tämän estämiseksi katkaisijan rinnalle kytketään usein kondensaattori.

Katkaisukipinä sytytystulpassa.

Esimerkki 7



Käämin resistanssi on 6,5 Ω ja induktanssi 0,80 H. Sähkövirta muuttuu käämissä kuvaajan mukaisesti. Laske käämin päiden välinen jännite hetkellä a) 1,0 s b) 3,0 s c) 5,0 s.

$R = 6{,}5\ \Omega, \quad L = 0{,}80\ \text{H}$

Keskimääräinen induktiojännite on $e_\text{k} = -L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$ ja itseinduktion aiheuttama jännitehäviö on $U_L = L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$.

Käämin päiden välinen jännite U on käämin johtimen resistanssin aiheuttaman jännitehäviön $U_\text{R} = RI$ ja itseinduktion aiheuttaman jännitehäviön $U_L = L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$ summa eli $U = U_\text{R} + U_\text{L}$.

a) Koska hetkellä 1,0 s sähkövirta kasvaa, käämin itseinduktiojännite vastustaa Lenzin lain mukaisesti sähkövirran kasvua. Sähkövirran muutosnopeus hetkellä 1,0 s saadaan kuvaajan fysikaalisesta kulmakertoimesta: $\dfrac{\Delta I}{\Delta t} = \dfrac{1{,}0\ \text{A}}{2{,}0\ \text{s}}$. Käämin päiden välinen jännite hetkellä 1,0 s on

$$U = U_R + U_L = RI + L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$= 6{,}5\ \Omega \cdot 0{,}50\ \text{A} + 0{,}80\ \text{H} \cdot \frac{1{,}0\ \text{A}}{2{,}0\ \text{s}} \approx 3{,}7\ \text{V}.$$

Jännite on 3,7 V.

b) Hetkellä 3,0 s sähkövirta ei muutu, joten induktiojännite on nolla. Käämin päiden välinen jännite on

$$U = RI = 6{,}5\ \Omega \cdot 1{,}0\ \text{A} = 6{,}5\ \text{V}.$$

Jännite on 6,5 V.

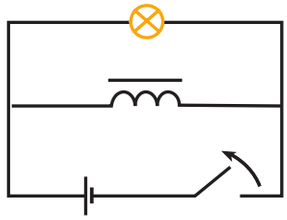
c) Koska hetkellä 5,0 s sähkövirta pienenee, käämin itseinduktiojännite pyrkii Lenzin lain mukaan ylläpitämään sähkövirtaa. Kuvaajasta saadaan virran muutosnopeudeksi $\dfrac{\Delta I}{\Delta t} = -\dfrac{1{,}0\ \text{A}}{2{,}0\ \text{s}}$. Käämin päiden välinen jännite hetkellä 5,0 s on

$$U = U_R + U_L = RI + L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$= 6{,}5\ \Omega \cdot 0{,}50\ \text{A} + 0{,}80\ \text{H} \cdot \left(-\frac{1{,}0\ \text{A}}{2{,}0\ \text{s}}\right) \approx 2{,}9\ \text{V}.$$

Jännite on 2,9 V.

Magneettikentän energia



Oppilastyö ▪ Magneettikentän energia
Tee kuvan mukainen kytkentä. Tarkkaile lamppua sähkövirran katkaisuhetkellä.

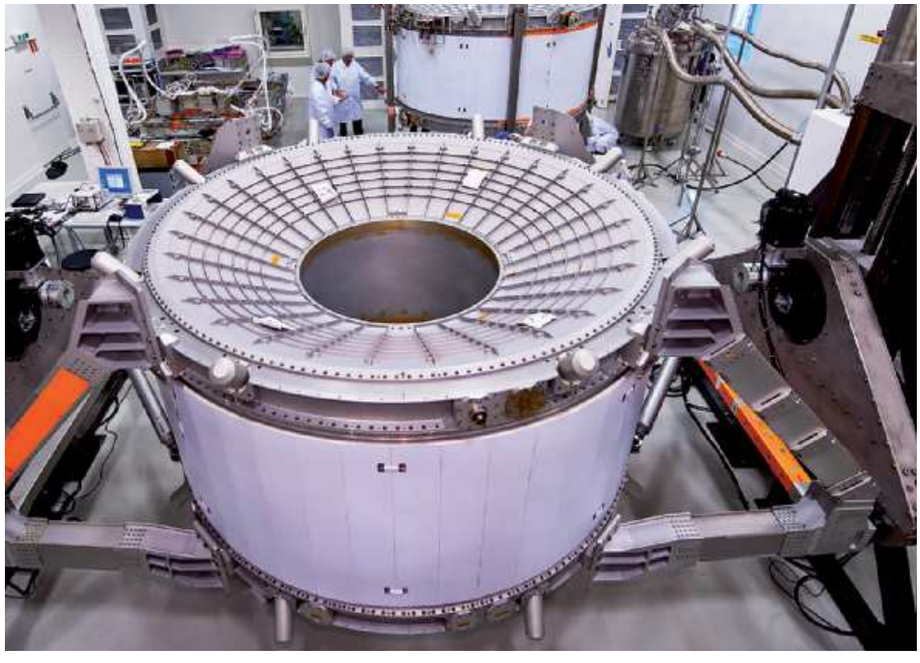
Kun oppilastyön kytkennässä tasavirtapiiri suljetaan, käämin ympärille muodostuu magneettikenttä. Tasavirtapiirissä sähkövirta kasvaa sitä hitaammin, mitä enemmän piirissä olevan käämin magneettikenttä pystyy varastoimaan energiaa.

Kun sähkövirta katkaistaan, magneettikenttä häviää. Katkaisuhetkellä lamppu välähtää voimakkaasti. Välähdyksen aiheuttaa käämin magneettikentän energian purkautuminen. Energia riippuu käämin induktanssista.

Käämin magneettikentän energia
Käämin magneettikentän luomiseen käytetty energia varastoituu käämin magneettikentän energiaksi

$$E_B = \frac{1}{2} LI^2,$$

jossa L on käämin induktanssi ja I käämissä kulkeva sähkövirta.



Suprajohtaviin magneetteihin voidaan varastoida magneettikentän energiaa jopa 7 MJ. Kuvan suprajohtava magneetti on CERNissä.

Esimerkki 8

Käämin induktanssi on 3,5 mH ja resistanssi 25 Ω. Käämi kytketään 230 V:n jännitteeseen.
a) Laske käämin magneettikentän energia, kun sähkövirta saa suurimman arvonsa.
b) Kuinka suuri kondensaattorin kapasitanssin tulisi olla, jotta kondensaattoriin varastoituisi yhtä paljon energiaa kuin 230 V:n jännitteeseen kytkettyyn käämiin?

$L = 3{,}5\ \text{mH}, \quad R = 25\ \Omega, \quad U = 230\ \text{V}$

a) Käämin magneettikentän energia on

$$E_\text{B} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}L\left(\frac{U}{R}\right)^2 = \frac{1}{2}\cdot 3{,}5\ \text{mH}\cdot\left(\frac{230\ \text{V}}{25\ \Omega}\right)^2$$
$$\approx 150\ \text{mJ}.$$

Käämin energia on 150 mJ.

b) Kondensaattorin sähkökentän energian on oltava yhtä suuri kuin käämin magneettikentän energia eli $\frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}LI^2$. Ratkaistaan yhtälöstä kondensaattorin kapasitanssi:

$$C = \frac{LI^2}{U^2} = \frac{L}{\left(\frac{U}{I}\right)^2} = \frac{L}{R^2} = \frac{3{,}5\ \text{mH}}{(25\ \Omega)^2} \approx 5{,}6\ \mu\text{F}.$$

Kondensaattorin kapasitanssin tulisi olla 5,6 μF.

Pohdi ja etsi

2-31. Selvitä itseinduktiojännitteen suunta, kun käämissä kulkeva sähkövirta kasvaa.

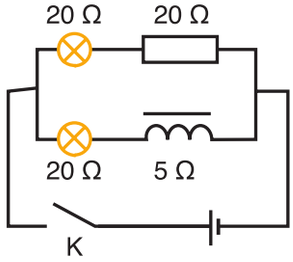
2-32. a) Luokan valot sammutetaan. Miksi katkaisijassa saattaa näkyä kipinä?
b) Miten tasavirtapiirissä oleva käämi vaikuttaa piirissä olevan lampun syttymiseen?
c) Miksi joidenkin sähkölaitteiden merkkivalot palavat vielä hetken sähkövirran katkettua?

2-33. Selvitä, miksi loistevalaisimessa käytetään käämiä eli kuristinta.

2-34. Pitävätkö seuraavat väitteet paikkansa?
a) Induktanssi kuvaa käämin ominaisuutta vastustaa käämissä kulkevan sähkövirran muutosta.
b) Virtapiirin induktanssi ei ole koskaan nolla.
c) Virtapiiriin voidaan käämin avulla synnyttää hetkellisesti korkea jännite.

2-35. Miten katkaisukipinä liittyy auton moottorin sytytysjärjestelmän toimintaan?

2-36. Oheisen kaavion mukaisessa kytkennässä vastuksen resistanssi on 20 Ω, hehkulamppujen resistanssit (nimellisjännitteellä) ovat 20 Ω. Rautasydämisen käämin resistanssi on 5 Ω. Selitä, mitä havaitaan, kun kytkin K suljetaan. [S2004, 8 (osa)]



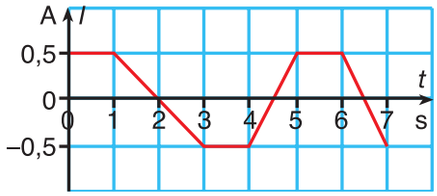
Tehtäviä

2-37. Käämissä on 660 kierrosta, ja siinä kulkeva 1,6 A:n sähkövirta aiheuttaa käämiin $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ Wb:n magneettivuon. Kun katkaisija avataan, sähkövirta häviää 0,040 sekunnissa. Määritä indusoituneen jännitteen keskimääräinen suuruus.

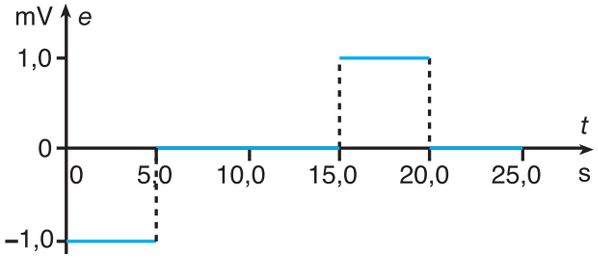
2-38. a) Käämin induktanssi on 0,20 H. Sähkövirta muuttuu 0,40 sekunnissa tasaisesti arvosta 0 A arvoon 5,0 A. Laske indusoitunut jännite.
b) Kun sähkövirta käämissä pienenee tasaisesti 0,12 sekunnissa arvosta 3,6 A arvoon 0 A, käämin napoihin indusoituu 24 V:n jännite. Käämin resistanssi on hyvin pieni. Laske käämin induktanssi.

2-39. Sähkövirran muutosnopeus käämissä on vakio 1,77 A/s. Tällöin käämiin indusoituu suuruudeltaan 5,5 V:n jännite. Laske käämin induktanssi.

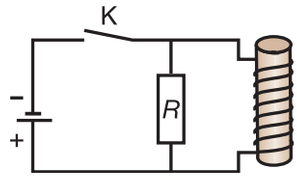
2-40. Virtapiirin osana olevan käämin induktanssi on 0,24 H ja resistanssi hyvin pieni. Käämissä kulkeva sähkövirta muuttuu kuvion mukaisesti. Esitä graafisesti käämin päiden välisen jännitteen riippuvuus ajasta aikavälillä 0,0 s ... 7,0 s.



2-41. Jännitelähteeseen kytkettyyn käämiin indusoituu kuvan mukainen ajasta riippuva jännite. Käämin induktanssi on 72 mH. Esitä jännitelähteen tuottama sähkövirta (t, I)-koordinaatistossa.

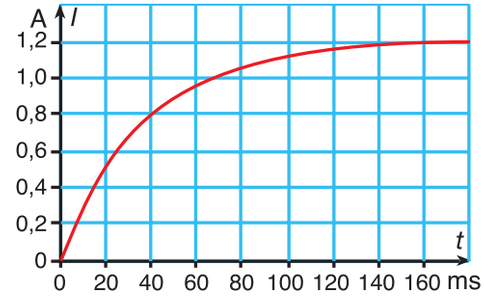


2-42. Sähkömagneetin käämilangan resistanssi on 125 Ω ja käämin rinnalle kytketyn vastuksen resistanssi 4,0 kΩ. Magneettia pidetään magnetoituna tasajännitelähteellä, jonka napajännite tällöin on 40 V. Kuinka suuri on sähkömagneetin käämin päiden välinen jännite heti kytkimen K avaamisen jälkeen? Päättele jännitteen napaisuus. [K2002, 14]



2-43. Kun käämi kytkettiin tasajännitelähteeseen ($E = 6{,}2$ V, $R_s \approx 0$ Ω) hetkellä $t = 0$ s, muistioskilloskooppia käyttäen saatiin oheinen kuvio.

a) Selitä, miksi käämissä kulkeva sähkövirta muuttuu kuvion mukaisesti.
b) Kuinka suuri on käämin resistanssi?
c) Määritä induktiojännite hetkellä 40 ms ja laske sen perusteella käämin induktanssi.



2-44. Käämissä kulkee muuttuva tasavirta. Käämin resistanssi on 12 Ω ja induktanssi 0,50 H. Kun sähkövirta on 2,5 A, käämin päiden välinen jännite $U_{AB} = 33$ V.
a) Onko virta pienenemässä vai kasvamassa?
b) Kuinka suuri on virran muuttumisnopeus?

2-45. Käämin induktanssi on 4,0 mH ja resistanssi 2,0 Ω. Käämi kytketään 12 V:n tasavirtalähteeseen, jolloin sähkövirta saavuttaa suurimman arvonsa 0,20 sekunnissa.
a) Kuinka suuri keskimääräinen itseinduktiojännite käämiin syntyy?
b) Kuinka suuri on käämin magneettikentän energia?

2-46. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 2,2 μF, on ladattu 230 V:n jännitteeseen. Kondensaattori kytketään käämiin, jonka induktanssi on 76 mH. Laske käämissä kulkevan sähkövirran suurin arvo, kun kondensaattori purkautuu.

Kuntopyörien polkemisvastus saadaan aikaan pyörrevirtojen avulla. Iso metallipyörä pyörii magneettien välissä, ja magneetit synnyttävät siihen pyörimistä vastustavia pyörrevirtoja.

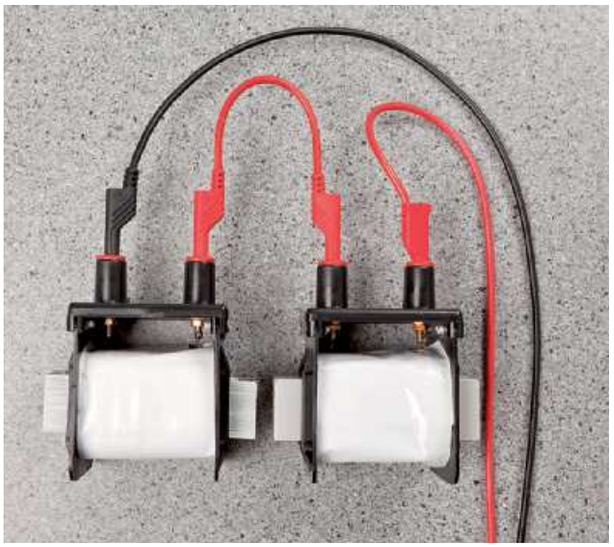
2.4 Pyörrevirrat

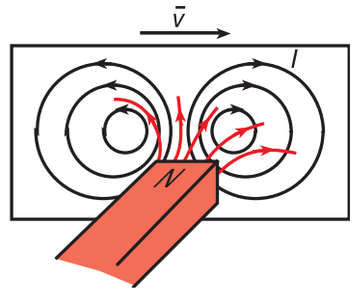
Oppilastyö ▪ Pyörrevirrat metallikappaleessa

1. Anna alumiinilevyn heilahdella voimakkaan magneetin napojen välissä. Tutki erimuotoisia kappaleita ja niiden heilahtelua. Tutki myös voimakkuudeltaan erilaisten magneettien vaikutusta heilahteluun.

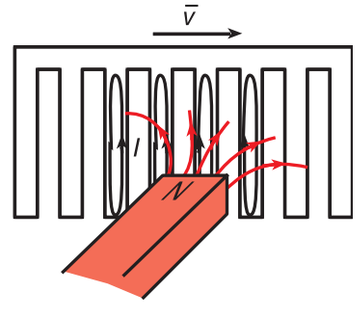
2. Kytke kaksi samanlaista käämiä sarjaan. Aseta toisen käämin sisälle rautasydän, joka on valmistettu ohuista rautalevyistä, ja toisen sisälle samankokoinen yhtenäinen rautasydän. Kytke käämeihin hetkeksi vaihtovirta. Irrota rautasydämet ja vertaile sydämien lämpötiloja. Pohdi ilmiön syitä.

3. Ota lasiputki ja kupariputki, jotka ovat keskenään yhtä pitkät, ja pudota pieni ja voimakas magneetti niiden läpi. Vertaa putoamisaikoja. Selitä ilmiö.





Metallilevyyn syntyy pyörrevirtoja levyn liikkuessa magneettikentässä.



Pyörrevirrat ovat kampamaisessa levyssä heikompia kuin yhtenäisessä levyssä.

Oppilastyön ensimmäisessä kohdassa todettiin levyn heilahtelun vaimenevan sitä nopeammin, mitä voimakkaampi magneetti oli. Kun yhtenäisen alumiinilevyn tilalle vaihdettiin kampamainen levy, heilahtelu vaimeni hitaammin. Oppilastyön toisessa kohdassa käämi, jonka sisällä oli ohuista rautalevyistä valmistettu sydän, lämpeni vähemmän kuin käämi, jossa oli yhtenäinen rautasydän. Oppilastyön kohdassa 3 pieni kestomagneetti putosi kupariputken läpi hitaammin kuin lasiputken läpi. Hidastuminen johtuu pyörrevirtojen aikaansaamista magneettikentistä ja magneettisten voimien putoamista hidastavasta vaikutuksesta.

Kun metallilevy heilahtaa magneettikenttään, levyn heilahtelu vaimenee. Magneettivuo levyn läpi muuttuu, ja levyyn indusoituu jännite. Magneettikentässä levyn vapaisiin johdinelektroneihin kohdistuu magneettinen voima, ja levyyn syntyy sähkömagneettisen induktion vaikutuksesta sähkövirtoja, **pyörrevirtoja**. Ne ovat magneettisessa vuorovaikutuksessa magneetin kanssa. Nyt pyörrevirrat syntyvät siten, että niiden aiheuttama magneettikenttä on ulkoisen kentän suunnalle vastakkainen.

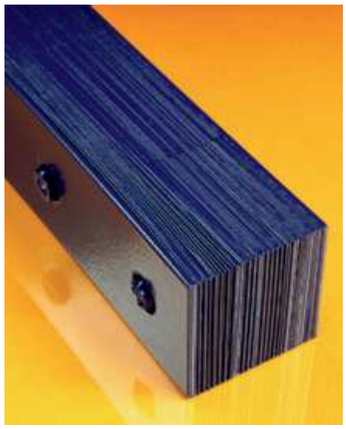
Kun levy poistuu magneettikentästä, levyyn indusoituvien pyörrevirtojen suunta on vastakkainen verrattuna tilanteeseen, jossa levy heilahtaa kenttään. Tällöin magneettikentät ovat samansuuntaiset. Indusoitunut magneettikenttä vahvistaa heikkenevää ulkoista magneettikenttää.

Pyörrevirrat syntyvät metallikappaleessa aina sellaiseen alueeseen, jossa magneettikentän magneettivuo muuttuu. Tämä muutos voi aiheutua joko kappaleen liikkeestä tai magneettikentän muutoksesta (magneetti voi liikkua kappaleen suhteen).

Pyörrevirrat syntyvät samalla tavalla kuin sähkövirta magneettikentässä liikkuvaan johdinsilmukkaan, mutta levyssä sähkövirrat voivat kulkea koko levyn alueella. Metallilevyyn syntyvien pyörrevirtojen suunta on sellainen, että niiden synnyttämä magneettikenttä pyrkii estämään levyn heilahtamisen magneettikenttään ja siitä pois, ts. estämään levyn liikkeen magneettiin nähden.

Jos levy on kooltaan niin pieni, että se pysyy heilahdellessaan koko ajan magneetin napojen välisessä homogeenisessa magneettikentässä, induktio ei vaimenna heilahtelua. Levyyn ei indusoidu pyörrevirtoja, koska levyn lävistävä magneettivuo ei muutu.

Pyörrevirrat
Magneettikentässä liikkuvaan metallilevyyn indusoituu sähkövirtoja niihin alueisiin, joissa magneettivuo muuttuu. Näitä sähkövirtoja nimitetään pyörrevirroiksi.
Pyörrevirtojen suunta on sellainen, että niiden synnyttämä magneettikenttä pyrkii estämään levyn liikkeen.



Pyörrevirrat ovat kampamaisessa levyssä vähäisiä sen rikkonaisen pinnan ja muodon vuoksi. Käämissä käytettävän rautasydämen rakenteella on merkitystä pyörrevirtojen syntymisessä. Jos sydän on koottu useista, toisistaan eristetyistä ohuista rautalevyistä, pyörrevirrat ovat heikompia kuin yhtenäisessä rautasydämessä, koska pyörrevirtoja ei pääse syntymään levyjä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Useista rautalevyistä koottu rautasydän myös lämpenee vähemmän.

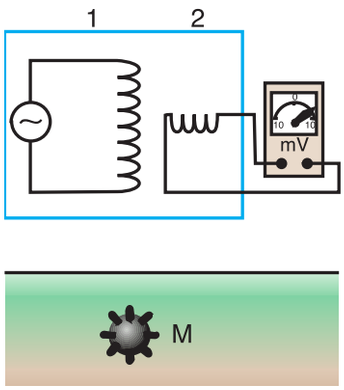
Pyörrevirrat aiheuttavat tehohäviöitä mm. generaattoreissa, moottoreissa ja muuntajien rautasydämissä, koska pyörrevirtojen takia osa energiasta muuntuu esimerkiksi muuntajan rautasydämen sisäenergiaksi eli rautasydän lämpenee. Pyörrevirtojen (ja tehohäviöiden) pienentämiseksi rautasydämet valmistetaan ohuista, toisistaan eristetyistä levyistä tai rautasydämissä käytetään ferriittimagneetteja, jotka ovat eristeitä.

Pyörrevirroilla on paljon sovelluksia. Pyörrevirtoja hyödynnetään kodeissakin yleistyvissä **induktioliesissä** sekä autojen ja moottoripyörien nopeusmittareissa, joissa niillä estetään osoittimen heilahtelua. Myös liikennevalojen vaihtumisessa ja liikennelaskennassa hyödynnetään pyörrevirtoja. Tarkkojen vaakojen heilahtelua vaimennetaan induktiojarruilla, jotka saavat vaa'an asettumaan mahdollisimman nopeasti tasapainoasemaansa.

Metalliensulattamoiden **induktiouuneissa** metalleja voidaan sulattaa pyörrevirtojen aiheuttaman lämpenemisen avulla. Sulatettavat metallikappaleet, esimerkiksi rautaromu, sijoitetaan korkean lämpötilan kestävään eristeastiaan. Astian ympärillä on käämi. Käämissä kulkevan vaihtovirran taajuus on noin 1 kHz. Metalleissa syntyvät pyörrevirrat nostavat metallin resistanssin takia metallin lämpötilan niin korkeaksi, että metalli sulaa. Menetelmän etuja ovat saasteettomuus, hyvä säädettävyys ja sulan metallin lisäaineiden helppo hallinta.

Junissa käytetään induktiojarruja. Junassa sähkömagneetit on sijoitettu siten, että ne asettuvat kiskojen molemmille puolille. Junaa jarrutettaessa sähkömagneetteihin kytketään sähkövirta, jolloin kiskoihin indusoituu pyörrevirtoja. Tällöin sähkömagneetteihin kohdistuu kiskoista liikkeen suunnalle vastakkainen voima, joka hidastaa junan etenemistä. Junaa jarrutettaessa kiskot lämpenevät.

Kodeissa käytettävät **sähkönkulutusmittarit**, kilowattituntimittarit, toimivat induktiokytkimillä. Mittarin herkkäliikkeiseen akseliin on kiinnitetty yhtenäinen metallilevy, joka pyörii ulkoisen muuttuvan magneettikentän aiheuttaman momentin vuoksi. Sähköverkkoa kuormittava vaihtovirta synnyttää mittarin alumiinilevyyn pyörrevirtoja, jotka pyörittävät levyä. Alumiinilevyn akseli on kytketty kierroslaskuriin ja mittarin näyttöön.



Metallinilmaisimen kaaviokuva.

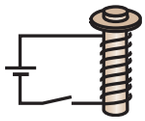
Metallinilmaisin koostuu kahdesta käämistä. Metallinilmaisimen toiminta perustuu pyörrevirtojen syntymiseen. Käämissä 1 kulkee vaihtovirta. Kun metalliesine M on ilmaisimen lähellä käämin 1 magneettikentässä, käämin 1 magneettikenttä muuttuu ja metalliesineeseen M indusoituu pyörrevirtoja. Metalliesineen M pyörrevirtojen aikaansaama muuttuva magneettivuo läpäisee osittain käämin 2, ja käämiin 2 indusoituu jännite. Millivolttimittari osoittaa syntyvän jännitteen. Metallinilmaisimen korkeataajuinen lähetin kytkeytyy induktiivisesti havaittavan metalliesineen kanssa. Metalliesine aiheuttaa metallinilmaisimessa energiahäviön, ja ilmaisin hälyttää. Kun metallinilmaisimen lähistöllä ei ole metalliesineitä, käämiin 2 ei indusoidu jännitettä, koska käämin 1 vaihtovirran synnyttämän magneettikentän muuttuva magneettivuo käämin 2 läpi on nolla systeemin geometriasta johtuen.

Induktiojännite käämissä 2 on sitä suurempi, mitä voimakkaampia metalliesineeseen syntyvät pyörrevirrat ovat. Pyörrevirrat taas ovat sitä voimakkaampia, mitä paremmin metalli johtaa sähköä tai mitä enemmän metallia on.

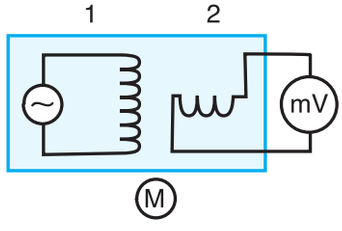
Metallinilmaisimen avulla voidaan etsiä hiekkarannalta metalliesineitä kuten nauloja.

2-47. a) Mitä pyörrevirroilla tarkoitetaan?
b) Selvitä induktiolieden toimintaperiaate. Pohdi induktiolieden etuja ja haittoja.
c) Selvitä pyörrevirtojen teknisiä sovelluksia.

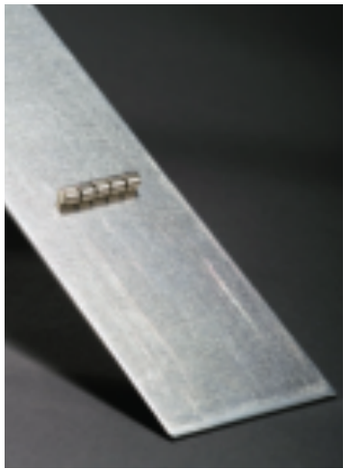
2-48. a) Vaakasuorassa oleva sauvamagneetti pääsee pyörimään vapaasti ripustuslankansa varassa. Miksi magneetin liike hidastuu, jos hyvin lähelle sen alapuolelle tuodaan metallilevy? Entä jos metallilevy korvataan muovilevyllä?
b) Alumiinirengas on asetettu kuvan mukaisesti rautasydämisen käämin päälle. Kun kytkin suljetaan, rengas lennähtää ilmaan. Selitä, minkä vuoksi.



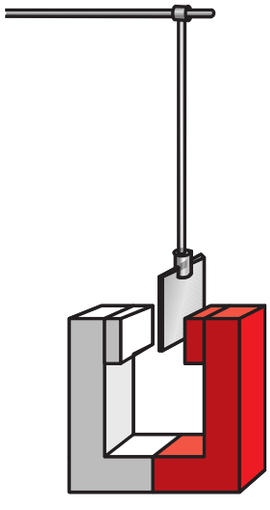
2-49. Oheinen kuva esittää yksinkertaisen metallinilmaisimen periaatetta. Primäärikäämiin 1 syötetään vaihtovirtaa ja sekundaarikäämiin 2 syntyvä vaihtojännite mitataan millivolttimittarilla.
a) Miksi millivolttimittari näyttää nollaa, kun lähistöllä ei ole metalliesineitä?
b) Miksi lähelle tuotu metalliesine M saa mittarin näyttämään jännitettä?
c) Miten tämä jännite riippuu metallin sähkönjohtavuudesta? [K2000, 8]



2-50. Oppilaat antoivat voimakkaiden, napin muotoisten magneettien vieriä pitkin muovi- ja alumiinilevyä. Mitä eroa nappimagneettien liikkeessä on eri alustoilla?



2-51. a) Tunnetussa kouludemonstraatiossa heiluri pysähtyy hyvin nopeasti, jos heilahtelu tapahtuu kestomagneetin napojen välissä (ks. kuva). Millaista materiaalia heilurin levy on, ja miksi pysähtyminen tapahtuu nopeasti? (3 p.)
b) Heilurissa on ensin lyijylevy ja sitten samankokoinen hopealevy. Kumpi heiluri pysähtyy nopeammin ja miksi? (1 p.) [K2008,8,osa]



Voimalaitoksissa samalla pyörimisakselilla on useita käämejä, joita pyöritetään voimakkaassa magneettikentässä. Esimerkiksi tuulen, veden tai kuuman höyryn liike-energia saa käämit pyörimään.

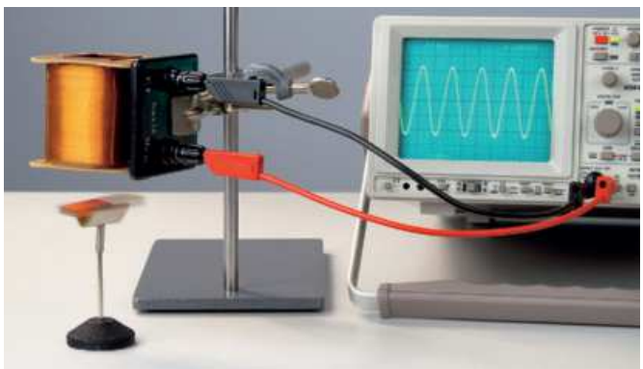
2.5 Generaattori

Sähkömagneettisen induktion tärkein sovellus on **generaattori**. Sen avulla mekaaninen energia voidaan muuntaa sähköksi. Generaattorissa käämin kulmanopeus on vakio; myös magneettia voidaan pyörittää käämin sisällä. Käämin akseli on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan.

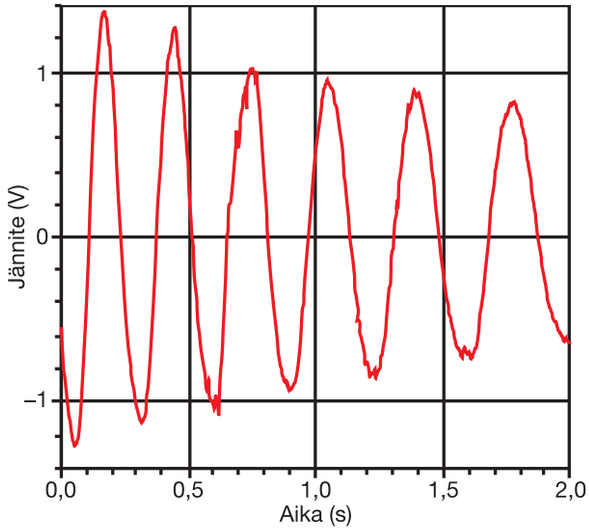
Oppilastyö ▪ Generaattori

Aseta sauvamagneetti telineeseen, joka pääsee pyörimään vaakatasossa, ja sen yläpuolelle, keskelle magneettia, käämi aukko alaspäin. Yhdistä käämi mittaustietokoneeseen tai oskilloskooppiin. Saata sauvamagneetti pyörimään likimain vakionopeudella. Tarkkaile näyttöä. Toista koe muuttaen sauvamagneetin etäisyyttä (korkeutta) magneetista.

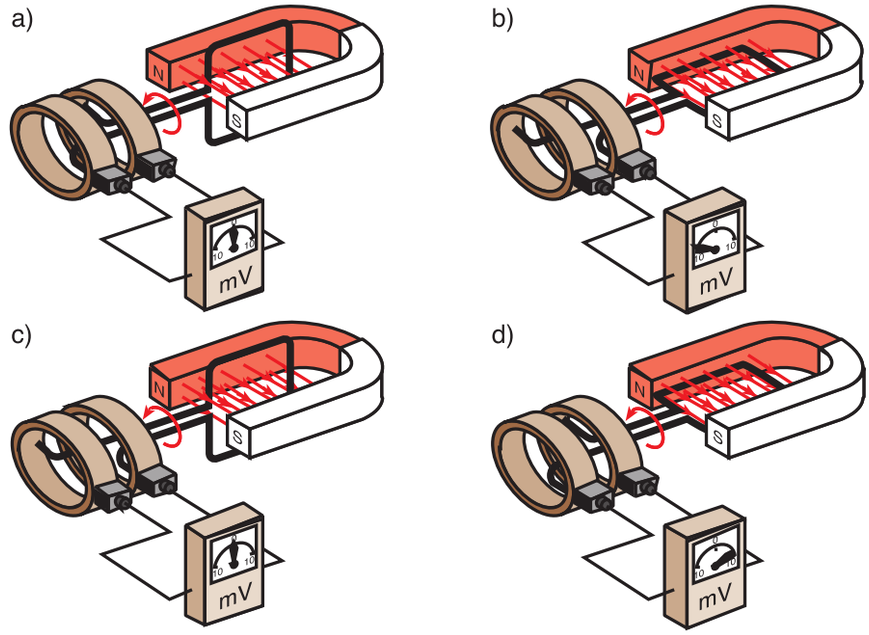
Vaikuttaako sauvamagneetin pyörimisnopeus näytölle syntyvään kuvaan?



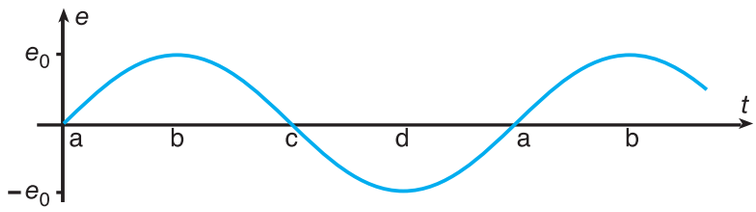
Magneetin pyöriminen hidastuu kitkan vuoksi. Tämä näkyy paitsi jaksonajan pitenemisenä myös indusoituneen jännitteen alenemisena.



Tarkastellaan magneettikentässä pyörivää johdinsilmukkaa. Silmukan pyöriessä magneettivuo silmukan läpi muuttuu. Silmukan napojen välille indusoituu jaksollisesti muuttuva lähdejännite: generaattori tuottaa **vaihtojännitettä**. Magneettikentässä vakiokulmanopeudella ω pyörivän silmukan taso on alkuhetkellä $t = 0$ s kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. Hetkellä t silmukka on kiertynyt kulman $\alpha = \omega t$ verran. Silmukan läpäisevä magneettivuo on $\Phi = AB\cos\alpha = AB\cos\omega t$.



Generaattorin malli. Kun silmukka pyörii magneettikentässä, magneettivuo käämin läpi muuttuu koko ajan. Silmukkaan indusoituu lähdejännite.



Sinimuotoinen vaihtojännite. Yksi jakso vastaa silmukan yhtä pyörähdystä.

Induktiolain mukaan silmukkaan indusoitunut ajasta riippuva lähdejännite on

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}(AB\cos\omega t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{AB\mathrm{d}(\cos\omega t)}{\mathrm{d}t} = AB\omega\sin\omega t.$$

Merkitään $AB\omega = e_0$, jolloin e_0 on lähdejännitteen huippuarvo, koska sinifunktion suurin arvo on yksi. Silmukan kulmanopeus on $\omega = 2\pi f$, jossa f on taajuus. Ajasta riippuva indusoitunut lähdejännite on $e = e_0\sin\omega t = e_0\sin(2\pi ft)$.

Indusoituneen jännitteen arvot vaihtelevat huippuarvojen e_0 ja $-e_0$ välillä. Huippuarvot saavutetaan niillä hetkillä, joina silmukan taso on magneettikentän suuntainen. Silmukkaan indusoitunut jännite saa suljetussa virtapiirissä aikaan sähkövirran. Jos virtapiirin kokonaisresistanssi on R, virtapiirissä kulkeva sähkövirta on

$$i = \frac{e}{R} = \frac{e_0}{R}\sin\omega t = i_0\sin\omega t = i_0\sin(2\pi ft),$$

jossa i_0 on sähkövirran huippuarvo.

Koska yhteen johdinsilmukkaan syntyvä jännite on pieni, johdinsilmukka korvataan käämillä. Jos käämissä on N kierrosta, on lähdejännite

$$e = NAB\omega\sin\omega t = NAB\omega\sin(2\pi ft) = e_0\sin(2\pi ft).$$

Generaattorin lähdejännite
Homogeenisessa magneettikentässä tasaisesti pyörivään käämiin indusoituu sinimuotoinen vaihtojännite

$$e = e_0\sin(\omega t) = e_0\sin(2\pi ft),$$

jossa vaihtojännitteen huippuarvo on $e_0 = NAB\omega = NAB\cdot 2\pi f$. Vaihtojännitteen taajuus on f, käämin kierrosluku N, käämin silmukan pinta-ala A ja magneettivuon tiheyden suuruus B.

Esimerkki 9

Sähkögeneraattorin mallina käytetty neliön muotoinen silmukka pyörii pyörimisnopeudella 3000 rpm homogeenisessa magneettikentässä. Silmukan sivun pituus on 12 cm. Magneettikentän magneettivuon tiheyden suuruus on 0,75 T.
Laske silmukkaan indusoituvan lähdejännitteen
a) taajuus ja jaksonaika
b) huippuarvo
c) arvo ajanhetkellä 1,2 ms.

$n = 3000\ \text{r/min}, \quad A = (0{,}12\ \text{m})^2 = 0{,}0144\ \text{m}^2,$
$B = 0{,}75\ \text{T}, \quad N = 1$

a) Koska silmukan pyörimisnopeus on

$$n = 3000\ \text{r/min} = \frac{3000}{60}\,\frac{1}{\text{s}} = 50\,\frac{1}{\text{s}},$$

silmukkaan indusoituneen lähdejännitteen taajuus on $f = 50$ Hz.

Jaksonaika on $T = \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{50\ 1/\text{s}} = 0{,}020\ \text{s} = 20\ \text{ms}.$

Taajuus on 50 Hz ja jaksonaika 20 ms.

b) Indusoituneen lähdejännitteen huippuarvo on

$$\begin{aligned} e_0 &= NAB\omega = NAB \cdot 2\pi f \\ &= 1 \cdot 0{,}0144\ \text{m}^2 \cdot 0{,}75\ \text{T} \cdot 2\pi \cdot 50\ \text{Hz} \\ &= 3{,}39292\ \text{V} \approx 3{,}4\ \text{V}. \end{aligned}$$

Huippuarvo on 3,4 V.

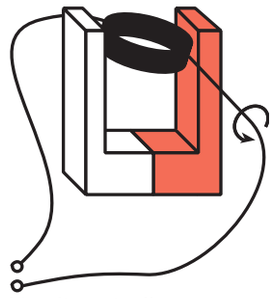
c) Lähdejännitteen arvo hetkellä 1,2 ms on

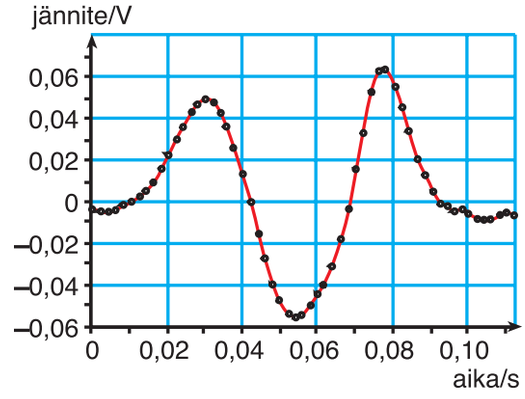
$$\begin{aligned} e &= e_0 \sin(2\pi f t) = 3{,}39292\ \text{V} \cdot \sin\,(2\pi \cdot 50\ \text{Hz} \cdot 1{,}2\ \text{ms}) \\ &\approx 1{,}2\ \text{V}. \end{aligned}$$

Indusoituneen jännitteen hetkellinen arvo on 1,2 V.

Esimerkki 10

Käämiä, jonka halkaisija on 16 mm ja jossa on 30 johdinkierrosta, pyöräytettiin lähes vakionopeudella kestomagneetin napojen välissä (kuva). Käämin navoista mitattiin tietokoneeseen kytketyllä jänniteanturilla oheisen kuvaajan mukainen jännite. Kuinka suuri on magneettivuon tiheys kestomagneetin napojen välissä? [K2000, 15]





Käämiin indusoituu jaksollinen jännite, koska käämin pyöriessä magneettikentässä magneettivuo käämin läpi muuttuu jaksollisesti. Magneettivuo käämin läpi on $\Phi = AB\cos\omega t$, jossa kulmanopeus ω on likimain vakio. Käämiin indusoitunut lähdejännite on

$$e = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -N\frac{\mathrm{d}(AB\cos\omega t)}{\mathrm{d}t} = NAB\omega\sin\omega t = e_0\sin\omega t.$$

Aikavälillä 0,012 s ... 0,0680 s indusoitunut jännite on lähes sinimuotoista. Kuvaajasta saadaan jaksonajaksi $T = 0{,}068\ \mathrm{s} - 0{,}012\ \mathrm{s} = 0{,}056\ \mathrm{s}$. Kuvaajasta saatavat jännitearvot ovat huippuarvoja. Jännitearvojen 0,048 V, 0,055 V ja 0,062 V keskiarvona saadaan keskimääräiseksi huippujännitteeksi $e_0 \approx 0{,}055\ \mathrm{V}$.

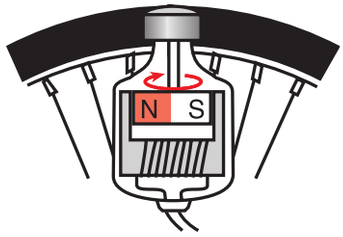
Koska huippujännite on $e_0 = NAB\omega = NAB2\pi n = NAB\dfrac{2\pi}{T}$, magneettivuon tiheydeksi saadaan

$$B = \frac{e_0}{NA\dfrac{2\pi}{T}} = \frac{0{,}055\ \mathrm{V}}{30\cdot\pi(0{,}0080\ \mathrm{m})^2\cdot\dfrac{2\pi}{0{,}056\ \mathrm{s}}} \approx 81\ \mathrm{mT}.$$

Magneettivuon tiheys on 81 mT.

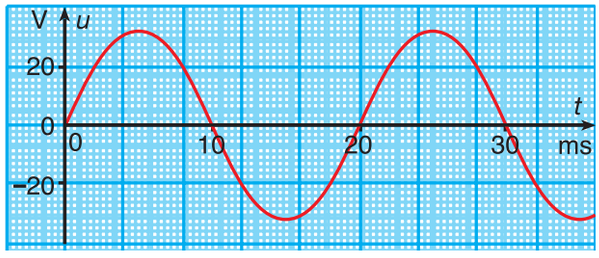
Tehtäviä

2-52. a) Polkupyörän dynamo on yksikertainen generaattori. Miten dynamo toimii?



b) Mikä pyörittää generaattorin käämiä vesivoimalaitoksessa, tuulivoimalaitoksessa ja ydinvoimalaitoksessa?

2-53. Piirros esittää magneettikentässä pyörivään johdinsilmukkaan indusoitunutta jännitettä. Silmukan pinta-ala on 125 cm^2.



a) Mistä seikoista riippuvat sinimuotoisen vaihtojännitteen taajuus ja suuruus?
b) Mikä on silmukan pyörimisnopeus?
c) Kuinka suuri on indusoituvan jännitteen huippuarvo?
d) Laske magneettivuon tiheys.

2-54. Generaattorin yksinkertaistetussa mallissa johdinsilmukka pyörii homogeenisessa magneettikentässä nopeudella 6600 r/min. Silmukan akseli on kohtisuorassa kenttää vastaan. Magneettivuon tiheys on 13 mT. Silmukka on muodoltaan neliö, jonka sivu on 15 cm.
a) Laske indusoitunut jännite hetkellä, jolloin silmukan taso on magneettikentän suuntainen.
b) Laske indusoitunut jännite hetkellä, jolloin silmukan taso on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan.
c) Piirin kokonaisresistanssi on 12 Ω. Laske sähkövirran huippuarvo sekä arvo hetkellä, jolloin silmukan kiertymä on 120°.

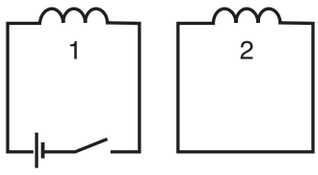
2-55. Generaattorin käämissä on 1200 johdinkierrosta, ja sen pinta-ala on 150 cm^2. Käämi pyörii magneettikentässä tasaisella kulmanopeudella 1500 rad/min siten, että sen akseli on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. Magneettivuon tiheys on 1,2 T.
a) Laske indusoituvan jännitteen huippuarvo.
b) Käämin päät yhdistetään vastuksella, jonka resistanssi on 20,0 Ω. Laske sähkövirran huippuarvo.

2-56. Käämi pyörii nopeudella 12 r/s homogeenisessa magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheys on 0,12 T. Käämin silmukan pinta-ala on 4,0 cm^2 ja kierrosten lukumäärä 40.
a) Esitä käämin napoihin indusoitunut jännite ajan funktiona.
b) Tutki graafisen laskimen avulla jännitteen kuvaajaa (t, e)-koordinaatistossa.

Testaa, osaatko

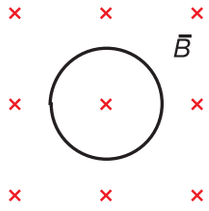
Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Kaksi käämiä on kytketty kuvan mukaisesti. Käämiin 2 indusoituu sähkövirta
a) sillä hetkellä, kun käämiin 1 kytketään sähkövirta
b) silloin, kun käämin 2 lähellä liikutetaan magneettia
c) aina, kun käämin 2 sisällä on magneetti.



2. Metallisauva liikkuu kohtisuorasti homogeenisen magneettikentän kenttäviivoja vastaan. Sauvan pituus on 38 cm ja magneettivuon tiheys 0,90 T. Millä nopeudella sauvan tulee liikkua, jotta sen päiden välille indusoituva jännite on 1,0 V?
a) 0,3 m/s b) 1,4 m/s c) 2,9 m/s

3. Johdinsilmukka on heikkenevässä magneettikentässä kuvan mukaisesti. Mikä väitteistä on tosi?
a) Silmukkaan ei indusoidu sähkövirtaa, koska silmukka ei liiku magneettikentässä.
b) Silmukkaan indusoituvan sähkövirran suunta on kuvassa myötäpäivään.
c) Silmukkaan indusoituvan sähkövirran suunta on kuvassa vastapäivään.



4. Edellisen tehtävän tilanteessa magneettivuon tiheyden heikkenemisnopeus on 10 mT/s. Silmukassa on 5 kierrosta, ja yhden silmukan pinta-ala on 10 cm^2. Silmukkaan indusoituva jännite on suuruudeltaan
a) 0 μV b) 10 μV c) 50 μV.

5. Kampamaiseen levyyn syntyvät pyörrevirrat ovat samankokoiseen ehjään levyyn syntyviin pyörrevirtoihin verrattuna
a) suuremmat
b) yhtä suuret
c) pienemmät.

6. Itseinduktiossa
a) käämin muuttuva sähkövirta aiheuttaa induktiojännitteen toiseen käämiin
b) johtimen muuttuva sähkövirta indusoi samaan johtimeen virranmuutosta vastustavan jännitteen
c) kappaleen alkeismagneetit asettuvat kentän magneettikentän suuntaisiksi.

7. Kaksi samanlaista alumiinikolikkoa pudotetaan yhtä aikaa, toinen niistä U-magneetin napojen välistä.
a) Kolikkojen putoamisajat ovat yhtä pitkät.
b) Magneetin välistä pudotetun kolikon putoamisaika on pidempi.
c) Magneetin välistä pudotetun kolikon putoamisaika on lyhyempi.

8. Generaattori on laite
a) joka muuntaa mekaanista energiaa sähköksi
b) jossa vaihtovirran synty perustuu johdinsilmukan pyörimiseen magneettikentässä
c) jossa jännite e vaihtelee jaksollisesti välillä $[-e_0, e_0]$.

Tiivistelmä

- Kun johdin on muuttuvassa magneettikentässä, siihen indusoituu jännite. Tämä aiheuttaa suljettuun virtapiiriin sähkövirran (induktiovirran). Ilmiötä kutsutaan sähkömagneettiseksi induktioksi.

- Lenzin laki: Induktiovirta on suunnaltaan sellainen, että sen vaikutukset vastustavat magneettikentän muutosta, josta induktio aiheutuu.

  Lenzin lain mukaan
  – heikkenevä ulkoinen magneettikenttä synnyttää induktiovirran, joka synnyttää alkuperäisen, ulkoisen magneettikentän suuntaisen kentän, ja alkuperäinen kenttä vahvistuu
  – vahvistuva ulkoinen magneettikenttä synnyttää induktiovirran, joka synnyttää alkuperäiselle, ulkoiselle magneettikentälle vastakkaissuuntaisen kentän, ja alkuperäinen kenttä heikkenee.

- Suoran johtimen induktiolaki: Kun suora johdin liikkuu vakionopeudella kohtisuorasti magneettikenttää vastaan, johtimen päiden välille indusoituu jännite (lähdejännite) $e = lvB$. Tässä johdin ja nopeus ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan.

- Induktiolaki: Kun johdinsilmukan läpäisevä magneettikentän magneettivuo muuttuu, silmukkaan syntyy keskimääräinen induktiojännite $e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

- Ilmiötä, jossa johtimen muuttuva sähkövirta indusoi samaan johtimeen sähkövirran muutoksia vastustavan jännitteen, sanotaan itseinduktioksi. Keskimääräinen induktiojännite: $e_k = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

- Käämin magneettikentän energia on $E_B = \frac{1}{2}LI^2$.

- Magneettikenttä synnyttää sähkövirtoja metallilevyn niihin alueisiin, joissa magneettikentän magneettivuo muuttuu. Näitä sähkövirtoja nimitetään pyörrevirroiksi. Pyörrevirtojen suunta on sellainen, että niiden synnyttämä magneettinen voima vastustaa levyn liikettä.

- Generaattorin käämiin indusoituva lähdejännite on $e = NAB\sin\omega t = NAB\sin(2\pi ft)$, jossa N on käämin kierrosmäärä.

3 Vaihtovirta

Tässä luvussa opit

- vaihtovirran historiaa
- vaihtovirran synnyn, kulun ja taajuusriippuvuuden
- muuntajan
- energiansiirron.

Keskeisiä käsitteitä ovat

- sähkövirta, jännitehäviö ja sähköteho
- vaihtovirran ja jännitteen vaihe sekä vaihe-ero
- jännitteen ja virran tehollliset arvot
- impedanssi ja reaktanssi.

Sähköauton akun lataaminen vaihtovirran avulla.

Hiljaiset ja pakokaasuttomat sisävarastoissa käytettävät sähkötrukit ladataan vaihtovirralla.

Vaihtovirran tuottaminen on yksinkertaista ja taloudellista

Vaihtovirta on sähkövirtaa, jonka suunta muuttuu jaksollisesti. Vaihtovirtaa tuotetaan yhteiskunnan käyttöön esimerkiksi vesi-, hiili-, ydin- ja tuulivoimalaitoksissa. Niissä virtaava vesi, höyry tai tuuli pyörittää sähkögeneraattoreihin liitettyjä turbiineja. Generaattorit tuottavat induktioperiaatteen mukaan vaihtojännitteen, joka synnyttää suljetussa virtapiirissä vaihtovirran. Jännitteen ja sähkövirran arvot muuttuvat sinifunktion mukaisesti ajan suhteen.

Generaattorien tuottama energia siirretään vaihtovirtana. Siirtojännite nostetaan korkeaksi (esimerkiksi 400 kV), jotta energiahäviöt pienenisivät. Korkeajännitteinen sähkö muunnetaan muuntajilla jälleen matalajännitteiseksi käyttäjiä varten. Suomessa kotitalouksien pistorasioista saatavan sähkön tehollinen jännite on 230 V (ks. sivu 135) ja taajuus 50 Hz.

Nykyään monet sähkölaitteet toimivat vaihtosähköllä. Tarvittaessa vaihtovirta voidaan tasasuunnata (ks. sivu 118), joten tasavirrallakin toimivien laitteiden tarvitsema energia voidaan saada sähköverkosta. Näissä laitteissa on muuntaja joko laitteen sisällä tai verkkojohtoon liitettynä.

Vaihtosähkön sovellukset eivät rajoitu pelkästään johtimissa kulkevaan vaihtovirtaan. Esimerkiksi radion, television ja matkapuhelimien välillä kulkeva informaatio välitetään sähkömagneettisena säteilynä, joka synnytetään ja vastaanotetaan vaihtovirtaan perustuvilla antenneilla. Samalla periaatteella kotiin voidaan luoda langaton lähiverkko, jolloin kuvaa, ääntä ja muuta tietoa voidaan siirtää langattomasti laitteesta toiseen, esimerkiksi tietokoneesta televisioon, äänentoistolaitteisiin tai kirjoittimiin.

Uusiutuvaa energiaa.

Edisonin laboratorio.

Edisonin hehkulamppu.

Vaihtovirran historiaa

Michael Faraday (1791–1867) oli englantilainen luonnontutkija, jonka tärkeimmät keksinnöt liittyivät sähköön. Faraday havaitsi 1830-luvulla sähkömagneettisen induktion, jonka avulla mekaanista energiaa voidaan muuttaa sähköksi.

James Clerk Maxwell (1831–1879) tutki sähkö- ja magneettikenttiä ja esitti matemaattisen teorian, joka voidaan tiivistää neljäksi yhtälöksi. Maxwellin yhtälöt esittävät, miten sähkö- ja magneettikenttä ovat sidoksissa toisiinsa. Yksi yhtälöistä kuvaa sitä, miten muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän (Faradayn induktiolaki), ja toinen sitä, miten sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän (Amperén–Maxwellin laki). Suuri osa nykyajan sähkötekniikasta – kuten sähkömoottorit, energiansiirto sähkön avulla, valokaapelit, radiot ja sähkömagneettinen viestintä – pohjautuu Maxwellin yhtälöiden kuvaamaan sähkömagnetismiin.

Teollistuvien yhteiskuntien sähköistyminen käynnistyi 1880-luvulla. *Thomas Alva Edison* (1847–1931) perusti ensimmäisen sähkövoimalaitoksen New Yorkiin vuonna 1882. Hän rakensi ensimmäiset sähkönjakeluverkot. Edison teki lukuisia sähköön liittyviä keksintöjä, joista tunnetuin on hehkulamppu. Valaistus oli aluksi lähes ainoa syy kotitalouksien sähköistämiseen. Edisonin sähkögeneraattorit tuottivat tasavirtaa ja energiaa siirrettiin melko matalajännitteisenä (110 V), joten resistanssista johtuvien tehohäviöiden vuoksi siirtolinjat eivät voineet olla pitkiä.

Edison ajautui pitkäaikaisiin kiistoihin *George Westinghousen* (1846–1914) kanssa, joka oli vaihtovirran kannattaja. Westinghousen tekniikka perustui *Nicola Teslan* (1856–1943) vaihtovirtaa koskeviin tutkimuksiin ja keksintöihin. Tesla hyödynsi induktiojännitteen synnyttämää vaihtovirtaa. Edisonin ja Westinghousen välinen väittely tasa- ja vaihtosähkön paremmuudesta jatkui kiivaana kahden vuosikymmenen ajan.

1890-luvulla keksittiin nykyisinkin käytössä oleva kolmivaihegeneraattori; kolme sellaista asennettiin vuosina 1895 ja 1896 Niagaran putoukselle. Tämä oli vaihtosähkön lopullinen läpimurto.

Vaihtovirta oli helppo muuntaa korkeajännitteiseksi, ja muuntamisen myötä energiansiirtohäviöt pienenivät. Lisäksi verkon rakentaminen tuli halvemmaksi, koska voitiin käyttää ohuempia johtimia kuin energiaa tasavirran avulla siirrettäessä. Energiaa voitiin myös siirtää paljon pitempiä matkoja kuin ennen. Näistä syistä Teslan kehittämä vaihtovirta pääsi kiistassa lopulta voitolle.

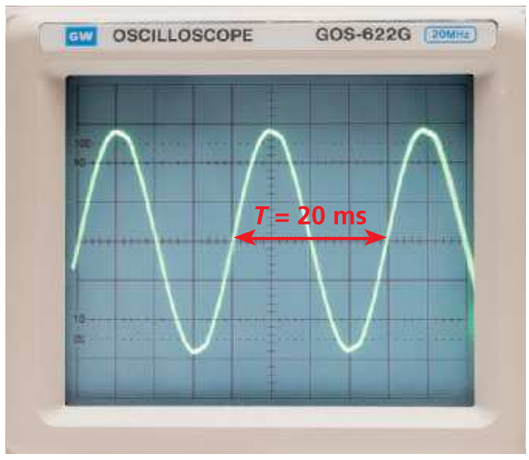
3.1 Vaihtovirta

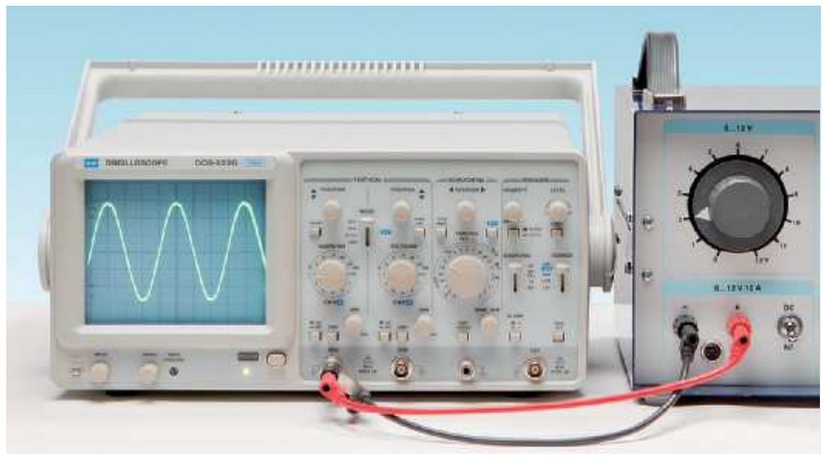
Vaihtovirran synty ja perussuureita

Sivulla 87 tutkittiin, kuinka magneettivuon muutos indusoi käämiin jaksollisesti muuttuvan jännitteen. Se aiheuttaa suljetussa virtapiirissä **sähkövirran suuruuden ja suunnan ajallisen** vaihtelun eli **vaihtovirran** induktioilmiön seurauksena.

Oppilastyö ▪ Vaihtojännite
Kytke sähköverkkoon liitetyn jännitelähteen vaihtojännite oskilloskooppiin. Määritä oskilloskoopin näyttöruudulta verkkojännitteen taajuus.

Oppilastyössä oskilloskoopin näyttöruudulla näkyy sinimuotoinen käyrä, joka esittää muuttuvaa jännitettä, **vaihtojännitettä**. Sen hetkellinen arvo voidaan määrittää oskilloskoopin herkkyysasteikon ja näytön y-akselin arvojen avulla ($y \mathrel{\hat{=}} e$). Hetkellisen jännitteen suurin arvo on **huippuarvo**, e_0. Tavallisesti vaihtojännite on sinimuotoista; piirroskuvissa sen symboli on $\sim$.





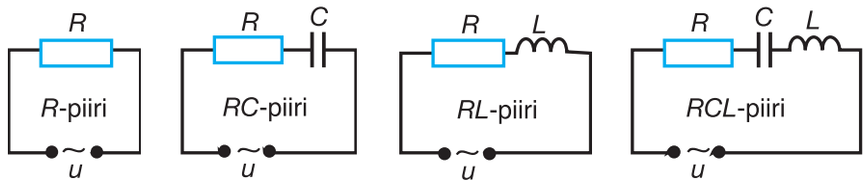
Sinimuotoisen jännitekäyrän jaksonaika voidaan määrittää pyyhkäisynopeuden ja näytön x-akselin arvojen avulla ($x \mathrel{\hat{=}} t$): jaksonaika on $T = 20$ ms. Vaihtojännitteen taajuus f on $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{20\ \text{ms}} = 50\ \text{Hz}$. Vaihtovirran taajuus on Suomessa 50 Hz. Esimerkiksi Pohjois-Amerikassa ja Japanin länsiosissa vaihtovirran taajuus on 60 Hz.

Kertaa generaattori sivulta 87.

Generaattorin tuottaman sinimuotoisen vaihtojännitteen arvo hetkellä t saadaan yhtälöstä $e = e(t) = e_0 \sin \omega t = e_0 \sin(2\pi ft)$, jossa e on hetkellinen jännite, e_0 jännitteen huippuarvo, ω kulmanopeus, $\omega t = 2\pi ft$ vaihekulma ja f vaihtojännitteen taajuus.

Huomaa, että generaattorin tuottamaa jännitettä merkitään kirjaimella e (lähdejännite) ja muulloin jännitettä merkitään yleensä kirjaimella u (esimerkiksi napajännite tai jännitehäviö).

3.2 Vaihtovirtapiirit

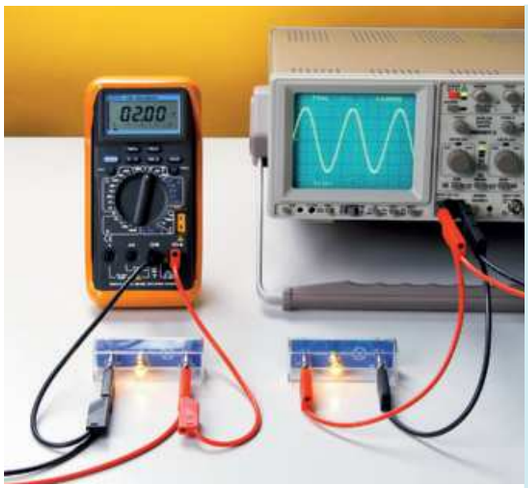


Erilaisia vaihtovirtapiirejä.

Vaihtovirtapiireissä on usein vastuksia, käämejä ja kondensaattoreita. Kaikki nämä komponentit toimivat vaihtovirtapiireissä omalla tavallaan. Esimerkiksi kunkin komponentin energiatarkastelut ovat erilaisia. Vastuksissa energiaa muuntuu vastuksen sisäenergiaksi resistanssin vaikutuksesta. Käämissä jaksollisesti muuttuva vaihtovirta synnyttää muuttuvan magneettikentän, johon on sitoutunut muuttuva määrä energiaa. Käämi lämpenee piirissä kuten vastuskin, koska käämissä on myös resistanssia. Vaihtovirta ei kulje kondensaattorin läpi, mutta sen levyjen varauksen suuruus ja merkki vaihtelevat jaksollisesti. Kondensaattorin levyjen välillä olevaan sähkökenttään on sitoutunut muuttuva määrä energiaa.

Yleismittarissa on omat mittausalueensa tasa- ja vaihtojännitteelle, samoin sähkövirroille. Kun mittaat vaihtovirtaa tai -jännitettä, valitse mittarista oikeat mittausalueet.

Vastus vaihtovirtapiirissä



Kuvan lamput hehkuvat yhtä kirkkaasti: $U \approx 2{,}0$ V ja $u_0 \approx 2{,}8$ V.

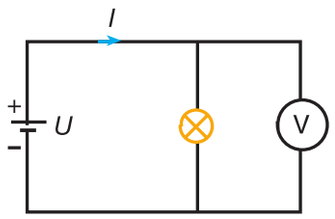
Oppilastyö ▪ Teholliset arvot

Kytke lamppu tasajännitelähteeseen. Mittaa lampun napojen välinen jännite volttimittarilla. Kytke toinen, edellisen kanssa samanlainen lamppu vaihtojännitelähteeseen. Säädä jännitteet niin, että lamput hehkuvat yhtä kirkkaasti.

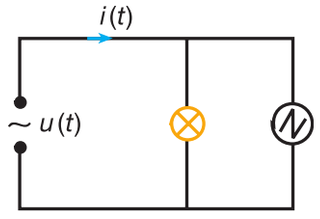
1. Mittaa vaihtojännitteeseen kytketyn lampun napojen välisen jännitteen huippuarvo oskilloskoopilla.

2. Mittaa vaihtojännitteeseen kytketyn lampun napojen välinen jännite volttimittarilla.

Vertaa oskilloskoopin kuvaputkelta luettua jännitteen huippuarvoa volttimittarin lukemaan.



Tasavirtapiiri.



Vaihtovirtapiiri.

Oppilastyössä lamput hehkuvat yhtä kirkkaasti eli ne kuluttavat yhtä paljon sähkötehoa, mutta oskilloskoopin esittämältä jännitekäyrältä saatava jännitteen huippuarvo on suurempi kuin volttimittarin lukema. Volttimittari ilmoittaa vaihtojännitteen tehollisen arvon.

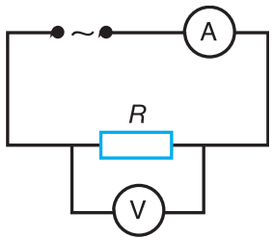
Vaihtovirran tehollinen arvo on yhtä suuri kuin sellaisen tasavirran arvo, joka lisää vastuksen sisäenergiaa (resistanssin seurauksena) yhtä paljon kuin kyseinen vaihtovirta (vastuksen sisäenergia kasvaa resistanssin takia). Vastaavaa jännitettä sanotaan **vaihtojännitteen teholliseksi arvoksi**. Vaihtovirran ja -jännitteen tehollisia arvoja merkitään tunnuksilla I ja U.

Vastuksen tehonkulutus

Vaihtovirtapiirissä olevan vastuksen tehonkulutus on

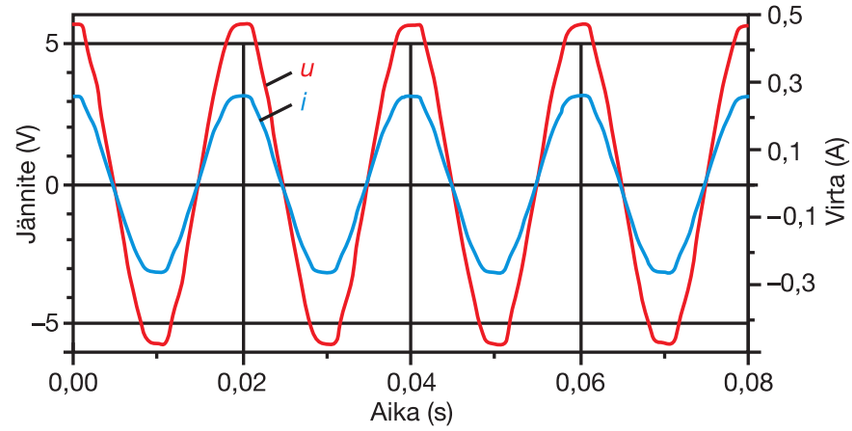
$$P = UI,$$

jossa U on vaihtojännitteen tehollinen arvo ja I vaihtovirran tehollinen arvo.



Oppilastyö ▪ Vastus vaihtovirtapiirissä

Kytke vastus vaihtojännitelähteeseen. Tutki tietokonepohjaisen mittausjärjestelmän (tai oskilloskoopin) avulla samanaikaisesti vastuksen jännitehäviötä ja vastuksen läpi kulkevaa vaihtovirtaa.



Vastuksessa sähkövirta ja jännitehäviö ovat samassa vaiheessa.

Vastuksen **jännitehäviö ja** vastuksessa kulkeva **sähkövirta** vaihtelevat molemmat sinimuotoisesti ja **saavuttavat huippuarvonsa ja nollakohtansa samanaikaisesti**. Vastuksessa tapahtuva jännitehäviö ja vastuksen läpi kulkeva sähkövirta ovat **samassa vaiheessa**.

Vaihtojännite ja -virta vastuksessa

Vastuksessa jännitehäviö on

$$u = u(t) = u_0 \sin \omega t = u_0 \sin(2\pi f t),$$

jossa u_0 on jännitehäviön huippuarvo.

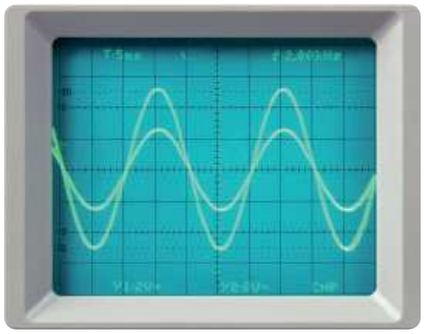
Vastuksen läpi kulkeva sähkövirta on

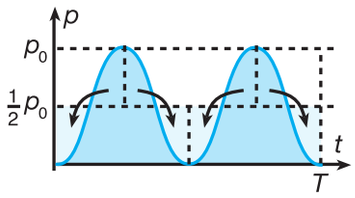
$$i = i(t) = i_0 \sin \omega t = i_0 \sin(2\pi f t),$$

jossa i_0 on sähkövirran huippuarvo.

Vastuksessa jännitehäviö ja sähkövirta ovat samassa vaiheessa.

Vaihtovirran ja -jännitteen teholliset arvot





Tehokäyrän hetkelliset arvot saadaan virran ja jännitteen hetkellisten arvojen tulona: $p(t) = u(t)i(t)$.

Kun sähkövirta kulkee vaihtovirtapiirissä olevan vastuksen läpi, vastus lämpenee hetkellisellä teholla

$$p = p(t) = u(t)i(t) = Ri(t) \cdot i(t) = R\big(i(t)\big)^2$$
$$= R(i_0 \sin \omega t)^2 = Ri_0^2 \sin^2 \omega t = p_0 \sin^2 \omega t.$$

Tehonkulutus vaihtelee arvon 0 ja **huipputehon** $p_0 = Ri_0^2$ välillä. Tehokäyrän ja aika-akselin väliin jäävän alueen fysikaalinen pinta-ala kuvaa piirin tekemää työtä. Käyrän $p(t) = p_0 \sin^2 \omega t$ symmetrian avulla voidaan osoittaa, että jakson aikana tehokäyrän ja aika-akselin väliin jäävä fysikaalinen pinta-ala on yhtä suuri kuin suorakulmion fysikaalinen pinta-ala, kun suorakulmion korkeus on $\frac{1}{2} p_0$. Vastuksen **keskimääräinen sähköteho** vaihtovirtapiirissä on $P = \frac{1}{2} p_0 = \frac{1}{2} Ri_0^2$, kun i_0 on sähkövirran huippuarvo.

Jos vaihtovirran tehollinen arvo on I, yhtä suuri tasavirta lämmittää vastusta teholla $P = RI^2$. Näin ollen saadaan yhtälö $RI^2 = \frac{1}{2} Ri_0^2$ eli $I^2 = \frac{1}{2} i_0^2$, joten vaihtovirran tehollinen arvo on $I = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$.

Toisaalta vaihtovirran teho on

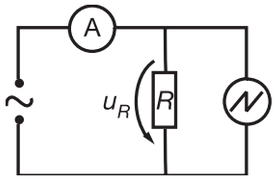
$$P = \frac{1}{2} p_0 = \frac{1}{2} u_0 i_0 = \frac{1}{2} u_0 I\sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} u_0 I = \frac{u_0}{\sqrt{2}} I = UI,$$

joten vaihtojännitteen tehollinen arvo on $U = \frac{u_0}{\sqrt{2}}$.

Oskilloskooppi näyttää jännitteen huippuarvon, yleismittari tehollisen arvon.

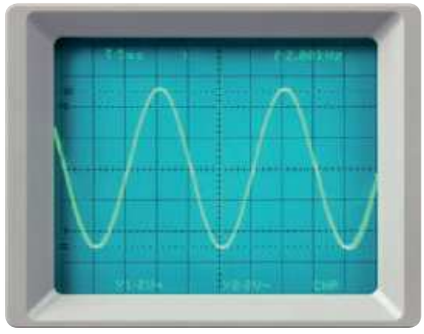
Vaihtovirran ja -jännitteen tehollliset arvot
Sinimuotoisen vaihtovirran tehollinen arvo on $I = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$, kun i_0 on vaihtovirran huippuarvo.
Vaihtojännitteen tehollinen arvo on $U = \frac{u_0}{\sqrt{2}}$, kun u_0 on vaihtojännitteen huippuarvo.

Esimerkki 1



Vaihtojännitelähde tuottaa kuvan piiriin vaihtovirtaa, jonka tehollinen arvo on 42 mA. Vastuksen päiden välinen jännite mitattiin oskilloskoopilla. Mikä on
a) vaihtovirran huippuarvo
b) jännitehäviön tehollinen arvo
c) vastuksen resistanssi?
Oletetaan, että piirissä ei ole muuta resistanssia kuin vastuksen resistanssi. Jakoväli VOLTS/DIV 1,0 V tarkoittaa, että yksi ruutu kuvaa pystysuunnassa jännitettä 1,0 V.

$I = 42$ mA



a) Vaihtovirran huippuarvo on $i_0 = I\sqrt{2} = 42 \text{ mA} \cdot \sqrt{2} \approx 59 \text{ mA}$.

b) Kuvaruudulla jännitekäyrän huipun korkeus x-akselin suhteen on 2,6 ruutua, eli huippujännite on 2,6 V.

Jännitehäviön tehollinen arvo on

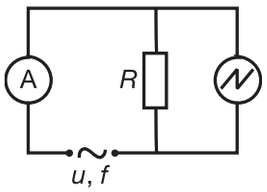
$$U = \frac{u_0}{\sqrt{2}} = \frac{2{,}6 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 1{,}838478 \text{ V} \approx 1{,}8 \text{ V}.$$

c) Piirin resistanssi on $R = \frac{U}{I} = \frac{1{,}838478 \text{ V}}{42 \cdot 10^{-3} \text{ A}} \approx 44\ \Omega$.

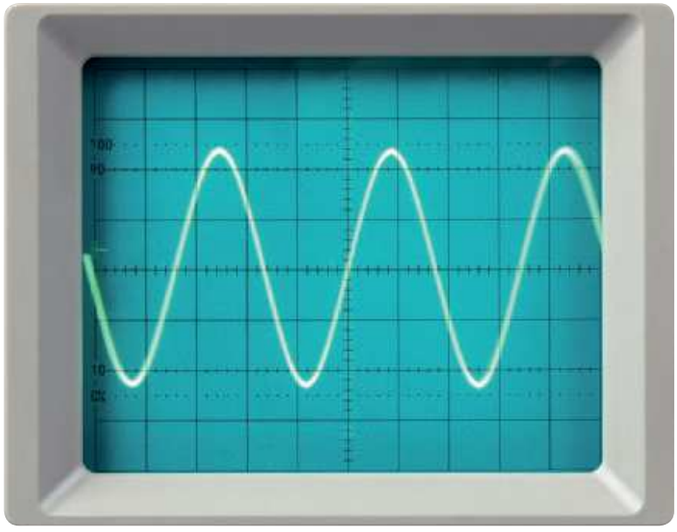
Sähkövirran huippuarvo on 59 mA, jännitehäviön tehollinen arvo 1,8 V ja resistanssi 44 Ω.

Tehtäviä

3-1. a) Oskilloskooppi on kytketty oheiseen virtapiiriin. Jännitelähteenä on signaaligeneraattori.

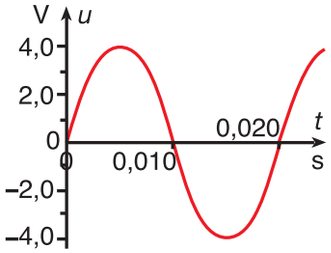


Oskilloskoopin kytkimistä on valittu jakovälit TIME/DIV 2 ms sekä VOLTS/DIV 0,1 V. Mitä tietoja voit saada oskilloskoopin kuvaruudulta?



b) Piiriin kytketty yleismittari (ampeerimittarina) näyttää 15 mA. Laske vastuksen resistanssi.
c) Piiristä irrotetaan oskilloskooppi. Mitä sen tilalle kytketty yleismittari (volttimittarina) näyttää?

3-2. Kuva esittää vaihtojännitettä ajan funktiona. Mikä on vaihtojännitteen
a) huippuarvo b) tehollinen arvo
c) jaksonaika d) taajuus?

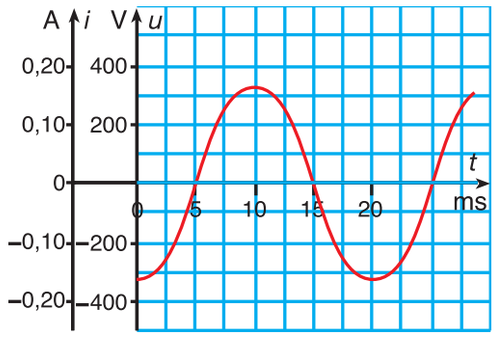


3-3. Pistorasiasta saadaan tehollinen jännite 230 V.
a) Laske vaihtojännitteen huippuarvo.
b) Voidaanko pistorasiaan kytkeä laite, joka kestää korkeintaan 290 V:n hetkellisen jännitteen?
c) Vaihtovirtalaitteiden komponentit on usein suunniteltava huippuarvojen mukaan. Miksi tehollisten arvojen mukainen suunnittelu ei riitä?

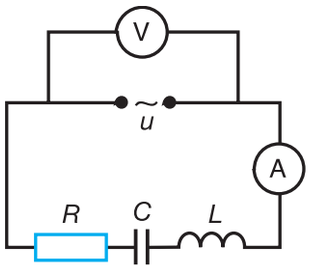
3-4. Oskilloskoopilla mitataan erään vastuksen päiden välisen jännitteen huippuarvoksi 120 V. Sähkövirran huippuarvo on 1,2 A. Laske
a) vastuksen resistanssi
b) vastuksen 45 minuutin aikana tuottama energia, joka aiheuttaa lämpenemistä
c) jännitehäviö vastuksessa sillä hetkellä, kun vaihtovirran hetkellinen arvo on 0,90 A.

3-5. Vaihtovirtaan kytketyn laitteen sähköteho on 1200 W ja laitteen resistanssi 24 ohmia. Laske vaihtovirran a) tehollinen arvo b) huippuarvo.

3-6. Kuvaajassa esitetään jännitehäviö vastuksessa ajan funktiona. Vastuksen resistanssi on 2,5 kΩ. Piirrä samaan koordinaatistoon vastuksessa kulkeva sähkövirta ajan funktiona. Jos sähkövirtaa mitataan yleismittarilla, mikä on mittarin lukema?



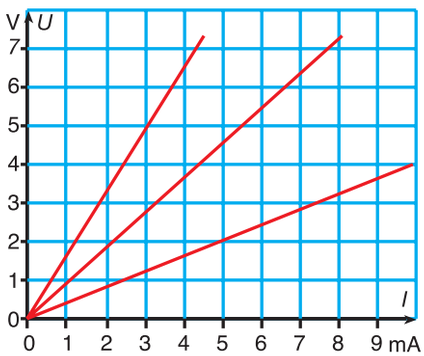
Vaihtovirtapiirin impedanssi



Oppilastyö ▪ Impedanssi

1. Rakenna vaihtovirtapiiri, jossa on sarjaan kytkettynä vastus, kondensaattori ja käämi. Liitä piiriin myös voltti- ja ampeerimittari. Mittaa piirissä kulkevaa tehollista sähkövirtaa jännitelähteen napajännitettä muuttamalla. Esitä tulokset graafisesti (I, U)-koordinaatistossa. Toista mittaussarja muuttamalla piirin komponentteja tai kytkemällä piiriin erilaisia komponentteja yksi kerrallaan.

2. Korvaa jännitelähde signaaligeneraattorilla. Miten jännitelähteen taajuuden muuttaminen vaikuttaa ampeerimittarin lukemaan, kun jännite pidetään vakiona?



$U \sim I$

Kun oppilastyön kohdassa 1 yhden mittauksen mittauspisteet siirretään (I, U)-koordinaatistoon, ne asettuvat mittaustarkkuuden rajoissa samalle suoralle. Tehollinen jännitehäviö vaihtovirtapiirissä on suoraan verrannollinen sähkövirran tehollisen arvoon, eli $U \sim I$. Verrannollisuuskerrointa merkitään vaihtovirtapiireissä kirjaimella Z ja kutsutaan **impedanssiksi**. Impedanssi kuvaa piirin aiheuttamaa vastusta vaihtovirralle. Oppilastyössä saadun suoran yhtälö on $U = ZI$, jossa U ja I ovat vaihtojännitteen ja -virran tehollisen arvot. Ohmin laki voidaan yleistää koskemaan myös vaihtovirtapiirejä vakiolämpötilassa.

Oppilastyön kohdassa 2 huomataan, että taajuuden muuttaminen vaikuttaa piirissä kulkevaan sähkövirtaan, kun jännite pidetään vakiona. Oppilastyö osoittaa, että vaihtojännitelähteen **taajuus vaikuttaa impedanssin suuruuteen**.

Kaiuttimen impedanssi on usein 4 Ω tai 8 Ω.

Vaihtovirtapiirin impedanssi

Vaihtovirtapiirin impedanssi Z on

$$Z = \frac{U}{I},$$

jossa U on vaihtojännitteen tehollinen arvo ja I vaihtovirran tehollinen arvo.

Impedanssi kuvaa piirin kykyä vastustaa vaihtovirtaa.

Vaihtojännitelähteen taajuus vaikuttaa impedanssin suuruuteen.

Kun imurin imutehoa säädetään, muutetaan imurin impedanssia.

Impedanssin yksikkö on $[Z] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}} = 1\ \Omega$ eli sama kuin resistanssin yksikkö.

Oppilastyön kohdassa 1 eri virtapiirien impedanssit saadaan suorien fysikaalisista kulmakertoimista. Jyrkintä suoraa edustavan vaihtovirtapiirin impedanssi on suurin,

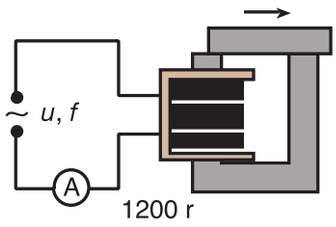
$$Z = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{6{,}4\ \text{V} - 0{,}0\ \text{V}}{4{,}0\ \text{A} - 0{,}0\ \text{A}} = 1{,}6\ \Omega.$$

Käämi vaihtovirtapiirissä

Oppilastyö ▪ Käämi tasa- ja vaihtovirtapiirissä

1. Kytke käämi tasavirtapiiriin ja mittaa piirissä kulkeva sähkövirta.

2. Kytke käämi signaaligeneraattoriin. Käytä pientä mutta teholliselta arvoltaan samansuuruista jännitettä kuin kohdassa 1 ja tarkkaile ampeerimittaria. Mittaa vaihtovirtapiirissä kulkeva sähkövirta a) ilman käämin U-rautasydäntä b) käyttäen avointa U-sydäntä c) käyttäen ikeellä suljettua U-sydäntä. Muuta jokaisessa kohdassa (a, b ja c) taajuutta ja tarkkaile samalla ampeerimittaria.



Vaihtovirran tehollinen arvo kasvaa, kun käämin induktanssia pienennetään.

Käämit valmistetaan kuparilangasta, joka on päällystetty ohuella eristekerroksella. Jos **tasavirtapiirissä** on vain käämi, sähkövirran kulkua vastustaa vain piirin johtimien ja käämin pieni resistanssi.

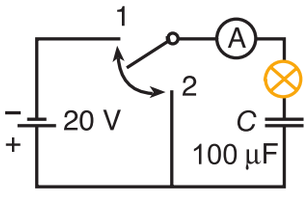
Kertaa itseinduktio sivulta 73.

Vaihtovirtapiirissä sähkövirta muuttuu jaksollisesti ja käämin ympärille syntyy muuttuva magneettikenttä. Tämä aiheuttaa käämin napojen välille itseinduktiojännitteen, joka pyrkii vastustamaan alkuperäisen sähkövirran muutoksia. Oppilastyössä huomataan, että vaihtovirta kasvaa, kun U-sydämen rautaiestä siirretään poispäin. Tällöin käämin induktanssi L pienenee, jolloin myös itseinduktiosta johtuva itseinduktiojännite pienenee.

Jos suurennetaan käämin induktanssia tai vaihtojännitteen taajuutta, vaihtovirtapiirin sähkövirta pienenee. Tällöin käämin vaihtovirtaa vastustava ominaisuus kasvaa.

Induktiivinen reaktanssi
Käämin vaihtovirtaa vastustavaa ominaisuutta kutsutaan induktiiviseksi reaktanssiksi X_L.

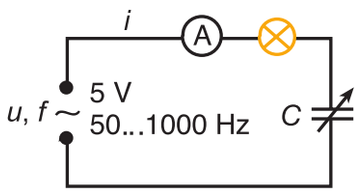
Kondensaattori vaihtovirtapiirissä



Tasavirtapiiriin liitetty kondensaattori latautuu, kun kytkin on asennossa 1, ja purkautuu, kun kytkin on asennossa 2.

Oppilastyö ▪ Kondensaattori tasa- ja vaihtovirtapiirissä
1. Kytke kondensaattori ja lamppu kuvan mukaisesti tasajännitelähteeseen. Tarkkaile lamppua ja ampeerimittaria, kun kytkin on asennoissa 1 ja 2.
2. Kytke kondensaattori ja lamppu signaaligeneraattoriin. Tarkkaile lamppua ja ampeerimittarin lukemaa, kun muutat taajuutta.

Kun oppilastyön kohdassa 1 kondensaattori liitetään vaihtokytkimen avulla tasajännitelähteeseen, ampeerimittarissa havaitaan virtasykäys. Tämä johtuu siitä, että kondensaattori latautuu (kytkimen asento 1). Kun kytkin käännetään asentoon 2, kondensaattori purkautuu ja ampeerimittarissa havaitaan virtasykäys päinvastaiseen suuntaan. Kummankin virtasykäyksen jälkeen ampeerimittarin lukema palautuu nollaksi. Latautumisesta ja purkautumisesta johtuvia virtasykäyksiä lukuun ottamatta piirissä ei kulje sähkövirtaa. Virtasykäystenkään aikana sähkövirta ei kulje kondensaattorin läpi. Näin ollen **tasavirta ei kulje kondensaattorin läpi** ja piiriin kytketty lamppu ei hehku.



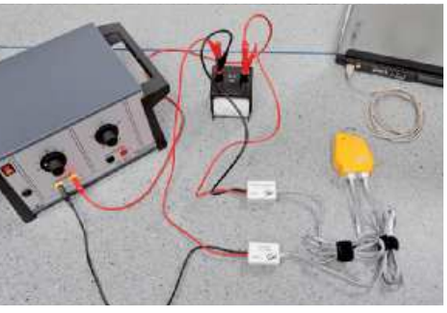
Vaihtojännitteen taajuus ja kondensaattorin kapasitanssin suuruus vaikuttavat sähkövirran suuruuteen.

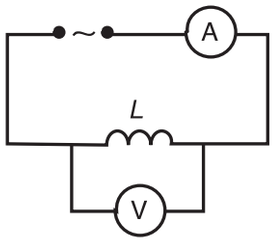
Kun oppilastyön kohdassa 2 kondensaattori liitetään vaihtojännitelähteeseen, kondensaattori vuoroin latautuu ja purkautuu: ampeerimittari osoittaa jatkuvaa sähkövirtaa. Näin ollen todetaan, että vaihtovirta kulkee piirissä, jossa on kondensaattori. Huomaa, että elektronit eivät kulje kondensaattorin läpi, mutta sen levyt varautuvat vuorotellen. Jos suurennetaan kondensaattorin kapasitanssia tai vaihtojännitteen taajuutta, vaihtovirtapiirin sähkövirta kasvaa niin, että lamppu hehkuu: tällöin siis kondensaattorin vaihtovirtaa vastustava ominaisuus pienenee.

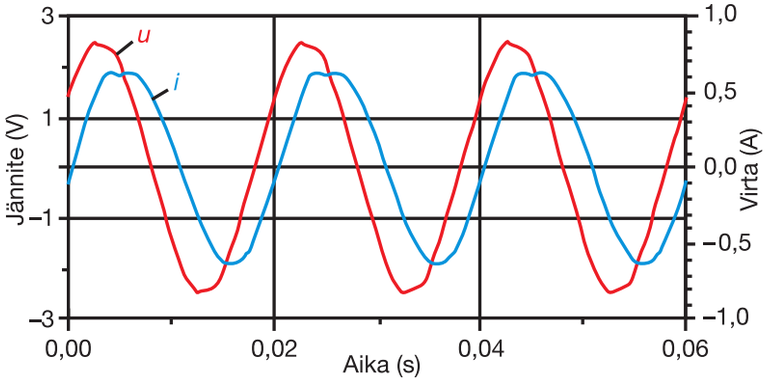
Kapasitiivinen reaktanssi
Kondensaattorin vaihtovirtaa vastustavaa ominaisuutta kutsutaan kapasitiiviseksi reaktanssiksi X_C.

Vaihe-ero

Oppilastyö ▪ Vaihe-ero
1. Kytke käämi vaihtojännitelähteeseen. Tutki tietokonepohjaisen mittausjärjestelmän (tai oskilloskoopin) avulla samanaikaisesti käämin jännitehäviötä ja käämin läpi kulkevaa vaihtovirtaa.
2. Vaihda käämin paikalle kondensaattori ja toista tutkimus.





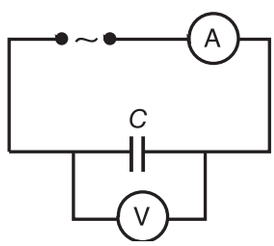


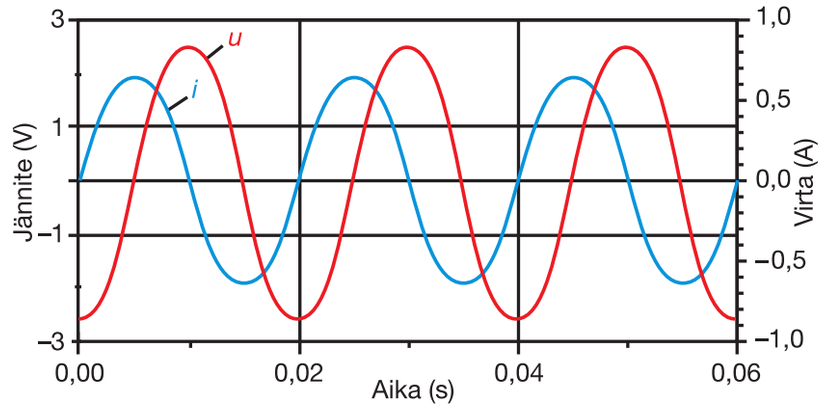
Oppilastyön kohdassa 1 saadun kuvaajan mukaan käämissä jännitehäviön ja sähkövirran huiput ja nollakohdat eivät ole ajallisesti samoilla kohdin, joten jännitehäviö ja sähkövirta eivät ole samassa vaiheessa. Tällöin sanotaan, että käämin päiden välisen jännitehäviön u_L ja sen läpi kulkevan sähkövirran i välillä on vaihe-ero. **Vaihe-ero** φ on **kulmasuure**, ja se ilmoitetaan asteina tai radiaaneina.

Käämissä tapahtuvan itseinduktion vuoksi **jännitehäviö on sähkövirtaa edellä.** Käämissä jännitehäviö saavuttaa maksimiarvon ennen sähkövirran maksimiarvoa. Itseinduktiojännite rajoittaa sähkövirran muuttumista, minkä takia sähkövirta jää jälkeen.

Ideaalisessa käämissä, jossa resistanssi on nolla, jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero on $\pi/2$. Jos käämissä on resistanssia, vaihe-ero on välillä $0 < \varphi < \pi/2$.

Oppilastyön kohdassa 2 havaitaan, että piirin sähkövirran ja kondensaattorin levyjen välisen jännitehäviön välillä on vaihe-ero; nyt jännitehäviön ja sähkövirran kuvaajat ovat päinvastaisessa järjestyksessä kuin käämin tapauksessa. Kun kondensaattori on täysin varautunut, sen levyjen välinen jännitehäviö on suurimmillaan ja sähkövirta on pienentynyt nollaksi. Tästä johtuu, että piirissä sähkövirta saavuttaa huippuarvonsa, ennen kuin **kondensaattorin** jännitehäviö saavuttaa huippuarvonsa, joten piirin **sähkövirta on jännitteen edellä**. Tällöin **vaihe-ero** on **negatiivinen**. Jos piirin resistanssi on pieni, vaihe-ero on $-\pi/2$.

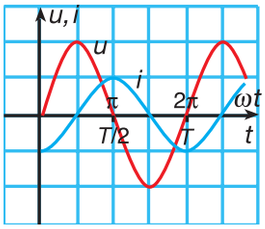




Vaihe-ero
Vaihtovirtapiirissä olevan käämin jännitehäviö on piirin sähkövirtaa edellä. Vaihe-ero on positiivinen.
Vaihtovirtapiirissä olevan kondensaattorin jännitehäviö on piirin sähkövirtaa jäljessä. Tällöin vaihe-ero on negatiivinen.

Vaihe-ero vastuksen ja käämin tai kondensaattorin välillä aiheutuu siitä, että vastus ei ole energiaa varastoiva komponentti kuten kondensaattori ja käämi. Energiaa varastoituu kondensaattoriin sähkökentän energiaksi ja käämiin magneettikentän energiaksi.

Esimerkki 2



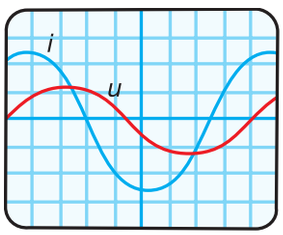
Kuvassa on esitetty jännitehäviö eräässä komponentissa sekä piirissä kulkeva sähkövirta.
a) Mikä aiheuttaa vaihe-eron? b) Määritä vaihe-ero.

a) Kuvaajan mukaan jännitehäviö saavuttaa maksimiarvon ensimmäisen kerran hetkellä $T/4$ ja sähkövirta hetkellä $T/2$, eli jännitehäviö on sähkövirran edellä. Vaihe-eron aiheuttavat käämi ja piirissä mahdollisesti oleva resistanssi.

b) Vaihe-ero voidaan määrittää esimerkiksi huippujen tai nollakohtien erosta. Sähkövirran huippua vastaa kuvassa kulma π rad ja jännitteen huippua likimain kulma $\frac{\pi}{2}$ rad. Jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero on edellisten erotus eli likimain $\frac{\pi}{2}$ rad. Koska vaihe-ero on $\frac{\pi}{2}$ rad, piirin resistanssi on nolla eli kyseessä on ideaalinen (resistanssiton) käämi.

Jännitehäviö on sähkövirtaa edellä. Vaihe-ero on $\frac{\pi}{2}$ rad.

Esimerkki 3



Sähkövirta on jännitehäviön edellä.

Kuvassa on esitetty jännitehäviö eräässä komponentissa sekä piirissä kulkeva sähkövirta. Määritä vaihe-ero. Vaaka-akselin yksi ruutu vastaa aikaa 1,0 µs.

Oskilloskoopin näytöltä voidaan lukea kuvaajien välinen aikaero Δt ja jaksonaika T. Vaihe-ero voidaan laskea aikaerosta: $\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi$ rad. Kuvasta nähdään esimerkiksi nollakohtien avulla, että kuvaajien välinen aikaero on 1,5 µs eli $\Delta t = 1{,}5$ µs. Jaksonaika on nollakohtien väli kaksinkertaisena eli $T = 9{,}0$ µs.

Vaihe-eron aiheuttaa kondensaattori ja piirin resistanssi.

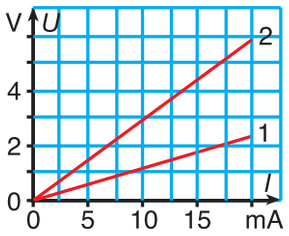
Vaihe-ero on

$$\varphi = -\frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi \text{ rad} = -\frac{1{,}5\ \mu\text{s}}{9{,}0\ \mu\text{s}} \cdot 2\pi \text{ rad} = -\frac{\pi}{3} \text{ rad} \approx -1{,}0 \text{ rad}.$$

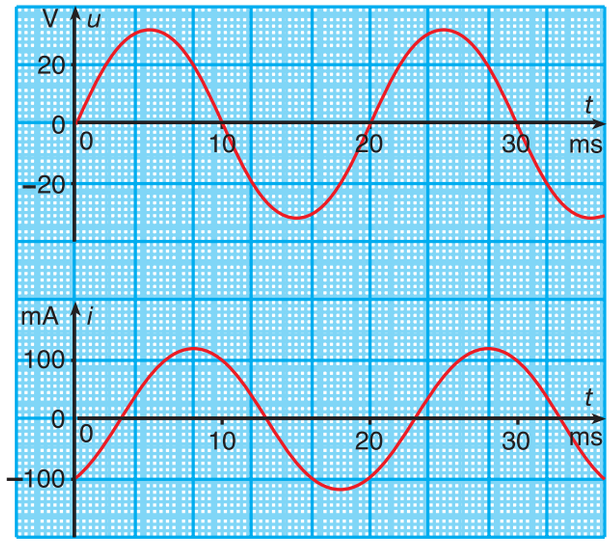
Vaihe-ero on $-1{,}0$ rad $(-60°)$.

Tehtäviä

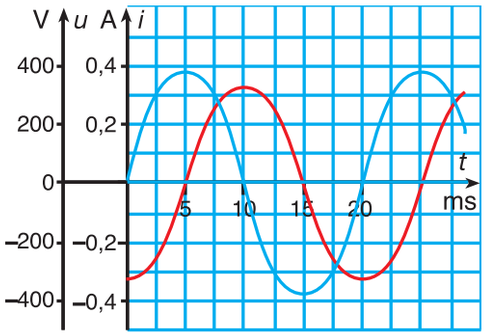
3-7. Vastus kytkettiin vaihtojännitelähteeseen. Kun jännitelähteen napojen välisen jännitteen ja piirissä kulkevan sähkövirran tehollliset arvot mitattiin, saatiin kuvaajan 1 mukaiset tulokset.
a) Piirrä kytkentäkaavio käytetystä kytkennästä.
b) Määritä vastuksen resistanssi.
c) Kytkentään lisättiin käämi ja kondensaattori, jolloin saatiin *RCL*-piiri. Mittaus toistettiin ja saatiin kuvaajan 2 mukaiset tulokset. Määritä *RCL*-piirin impedanssi.
Ampeerimittarin resistanssi oletetaan pieneksi.



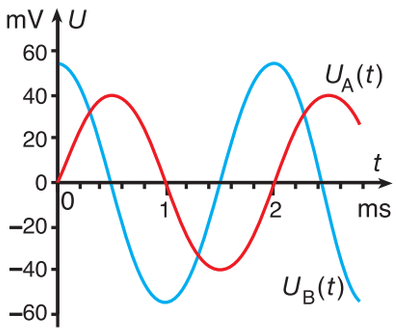
3-8. Oheinen kuvio esittää vaihtovirtalähteeseen kytketyn komponentin jännitehäviötä ja laitteen läpi kulkevaa sähkövirtaa.
a) Mistä vaihe-ero johtuu?
b) Jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero on 1) 0,30 rad 2) 3,3 ms 3) 54°.



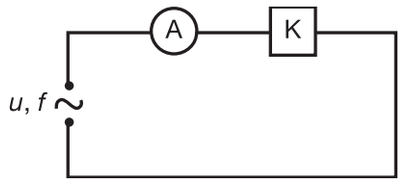
3-9. Kondensaattori kytkettiin vaihtojännitelähteeseen. Kuvaajassa esitetään kondensaattorin jännitehäviö ja piirissä kulkeva sähkövirta ajan funktiona.
a) Kumpi kuvaaja edustaa jännitehäviötä? Perustele.
b) Määritä jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero.
c) Määritä piirin impedanssi.



3-10. Komponentit A ja B kytkettiin sarjassa vaihtojännitelähteeseen. Komponenttien navoista mitattiin oskilloskoopilla samanaikaisesti kuvan mukaiset jännitehäviöt.
a) Päättele, mitä komponentteja A ja B voivat olla.
b) Millä hetkellä lähteen jännitehäviö on 0 V?



Impedanssin riippuvuus taajuudesta



Komponentti K on vuorotellen vastus, käämi tai kondensaattori.

Oppilastyö ▪ Vaihtovirran riippuvuus lähdejännitteen taajuudesta

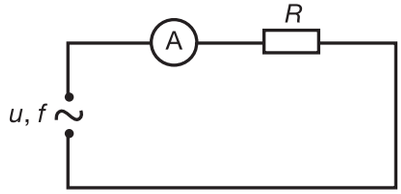
Käytä vaihtovirtapiirin jännitelähteenä signaaligeneraattoria. Pidä jännitelähteen napajännite vakiona kussakin mittauksessa. Muuta lähdejännitteen taajuutta ja tutki sähkövirran tehollisarvon riippuvuutta taajuudesta, kun piirissä on vuorotellen 1. vastus 2. käämi 3. kondensaattori. Toista kukin mittaus käyttäen muutamaa erilaista komponenttia.

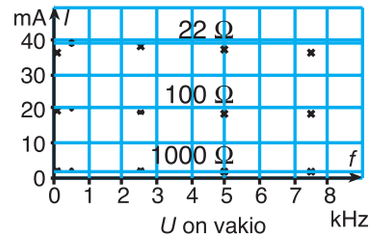
Tutkitaan oppilastyössä saatuja mittaustuloksia.

1 Piirissä on vastus

Taulukossa on sähkövirran tehollliset arvot viidellä eri taajuudella ja kolmella eri vastuksella mitattuina.

Taajuus *f*/Hz	*I*/mA	*I*/mA	*I*/mA
50	36,8	19,7	2,2
500	39,4	19,9	2,2
2500	38,6	19,1	2,1
5000	37,2	18,9	2,0
7500	36,1	18,2	1,9
	$R = 22\ \Omega$	$R = 100\ \Omega$	$R = 1000\ \Omega$



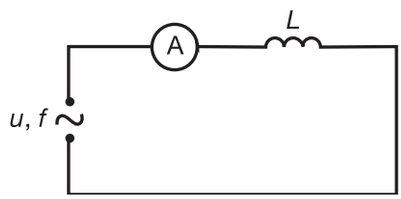


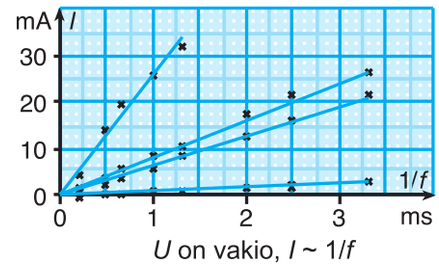
Kun mittaustulokset esitetään (f, I)-koordinaatistossa, havaitaan, että pisteiden kautta asetetut suorat ovat mittaustarkkuuden rajoissa vaakasuorassa. Kun piirissä on pelkkä vastus, sähkövirran tehollinen arvo ei riipu vaihtojännitteen taajuudesta. Tämä johtuu siitä, että resistanssi ei riipu taajuudesta.

2 Piirissä on käämi

Taulukossa on sähkövirran teholliset arvot neljälle eri käämille eri taajuuksilla mitattuina.

Taajuus f/Hz	$\frac{1}{f}$ / ms	I/mA	I/mA	I/mA	I/mA
300	3,3		26,6	21,6	2,9
400	2,5		21,8	16,3	2,1
500	2,0		17,5	13,0	1,8
750	1,3	32,4	10,7	8,5	1,2
1000	1,0	26,0	8,5	6,1	0,94
1500	0,67	19,5	5,6	3,8	0,47
2000	0,50	14,3	3,8	2,6	0,27
5000	0,20	4,7	1,9	1,3	0,11
		$N = 600$ r	$N = 1200$ r	$N = 1800$ r	$N = 600$ r rautasydän (rengas)





Oletetaan, että käämi on ideaalinen. Oppilastyön taulukoiduista mittaustuloksista havaitaan, että taajuuden kasvaessa käämin läpi kulkeva sähkövirta pienenee. Kun mittaustulokset esitetään $\left(\frac{1}{f}, I\right)$-koordinaatistossa, kuvaajat ovat mittaustarkkuuden rajoissa suoria. Näin ollen sähkövirran tehollinen arvo on kääntäen verrannollinen taajuuteen eli $I \sim \frac{1}{f}$. Tällöin käämin vaihtovirtaa vastustava ominaisuus, **induktiivinen reaktanssi** X_L, kasvaa, koska käämin jännitehäviön tehollinen arvo piirissä pysyy muuttumattomana.

Käämin tehollinen jännitehäviö on $U = ZI \approx X_L I$, jos käämin resistanssi oletetaan pieneksi. Mittauksen mukaan induktiivinen reaktanssi on siis suoraan verrannollinen taajuuteen eli $X_L \sim f$.

Lenzin lain mukaan käämin itseinduktiojännite $e_k = -L\dfrac{\Delta i}{\Delta t}$ vastustaa vaihtovirtapiirin jännitelähteen tuottaman sähkövirran muutoksia sitä voimakkaammin, mitä suurempi käämin induktanssi L on ja mitä nopeammin muutokset tapahtuvat.

Induktiivinen reaktanssi
Käämin induktiivinen reaktanssi X_L on

$$X_L = \omega L = 2\pi f L,$$

jossa f on vaihtojännitteen taajuus ja L käämin induktanssi.

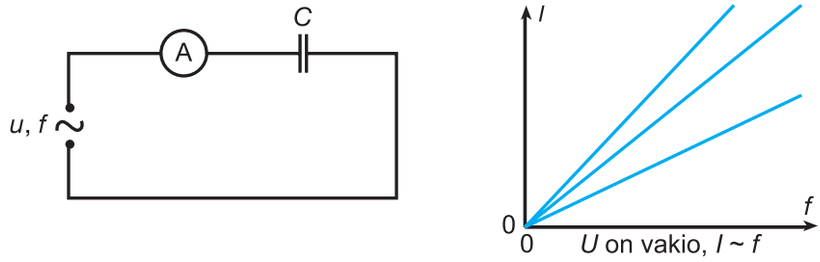
Induktiivisen reaktanssin yksikkö on

$$[X_L] = [f][L] = 1\,\text{Hz} \cdot 1\,\text{H} = 1\,\frac{1}{\text{s}} \cdot 1\,\frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1\,\frac{\text{V}}{\text{A}} = 1\,\Omega.$$

Huomaa, että käämin induktiivinen reaktanssi on sitä pienempi, mitä pienempi vaihtovirran taajuus on. Käämi, jolla on pieni induktanssi, muistuttaa alhaisilla vaihtovirran taajuuksilla vastusta. Oppilastyön kohdan 2 piirissä, jossa oli 600-kierroksinen käämi ilman rautasydäntä, sähkövirta pysytteli likimain vakiona taajuuksilla 300 Hz, 400 Hz ja 500 Hz eli käämin induktiivinen ominaisuus ei näkynyt. Tästä syystä kyseiset mittaustulokset on jätetty pois taulukosta.

3 Piirissä on kondensaattori

Kun piirissä on kondensaattori ja vaihtojännitelähde, (f, I)-koordinaatistoon piirretyistä kuvaajista havaitaan, että sähkövirran tehollinen arvo kasvaa vaihtojännitteen taajuuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että kondensaattorin vaihtovirtaa vastustava suure, **kapasitiivinen reaktanssi** X_C, pienenee taajuuden kasvaessa eli $X_C \sim 1/f$. Mittauksissa jännite pysyi muuttumattomana.



Mitä suurempi on kondensaattorin kapasitanssi, sitä suurempi on sen kyky varastoida sähkövarausta ja sitä suurempi on levyjen välillä johdinta pitkin edestakaisin kulkeva sähkövirta.

Kapasitiivinen reaktanssi
Kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi X_C on

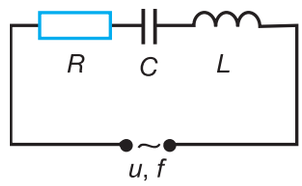
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C},$$

jossa f on vaihtojännitteen taajuus ja C kondensaattorin kapasitanssi.

Kapasitiivisen reaktanssin yksikkö on

$$[X_C] = \frac{1}{[f][C]} = \frac{1}{1\,\text{Hz} \cdot 1\,\text{F}} = \frac{1}{1\,\frac{1}{\text{s}} \cdot 1\,\frac{\text{As}}{\text{V}}} = 1\,\frac{\text{V}}{\text{A}} = 1\,\Omega.$$

RCL-piiri



***RCL*-piiri.**

Tarkastellaan piiriä, jossa on kytketty sarjaan vastus, kondensaattori ja käämi. Vastuksen resistanssi on R, kondensaattorin kapasitanssi C ja käämin induktanssi L. Tällaista piiriä kutsutaan ***RCL*-piiriksi**. Aikaisemmin on tutkittu vaihtovirtapiirien impedanssia, jännitehäviön ja sähkövirran välistä vaihe-eroa eri

komponenteissa sekä sitä, kuinka eri komponentit vastustavat vaihtovirtaa. On saatu seuraavat tulokset:

1. Vaihtovirtapiirien sähkövirtaa vastustava ominaisuus on impedanssi Z.
2. Vastuksessa ja koko piirissä kulkeva sähkövirta on samassa vaiheessa kuin jännitehäviö vastuksessa.
3. Käämissä jännitehäviö on sähkövirtaa edellä.
4. Kondensaattorissa jännitehäviö on piirissä kulkevaa sähkövirtaa jäljessä.
5. Käämin sähkövirtaa vastustavia ominaisuuksia kuvaa induktiivinen reaktanssi X_L ja kondensaattorin sähkövirtaa vastustavia ominaisuuksia kapasitiivinen reaktanssi X_C.

RCL-piirin impedanssi ja reaktanssi
RCL-piirin impedanssi on

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

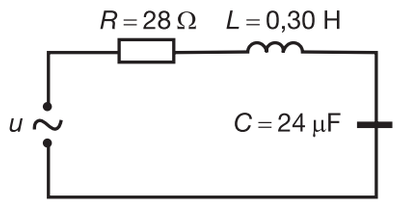
jossa R on virtapiirin resistanssi, X_L induktiivinen reaktanssi ja X_C kapasitiivinen reaktanssi.
Suuretta $X = X_L - X_C$ kutsutaan piirin reaktanssiksi.

Impedanssin, reaktanssin ja resistanssin yksikkö on 1 Ω.

Huomaa, että kaikilla vaihtovirtapiireillä on resistiivisiä, kapasitiivisia ja induktiivisia ominaisuuksia, vaikka piirissä ei olisikaan vastaavia komponentteja, kuten vastusta, kondensaattoria ja käämiä.

Kun _RCL_-piirissä reaktanssi on nolla, piiri on resonanssissa. Resonanssi liittyy oleellisesti radiotekniikkaan. Resonanssiin palataan luvussa 4.

Esimerkki 4



Kuvan *RCL*-piiri on kytketty vaihtojännitelähteeseen. Piiri kytketään vaihtojännitteeseen, jonka taajuus on 50 Hz ja tehollinen jännite 12 V. Laske
a) piirin impedanssi
b) käämissä kulkevan vaihtovirran tehollinen arvo
c) piirissä kulkevan vaihtovirran suurin tehollinen arvo, joka voidaan saavuttaa säätökondensaattorin kapasitanssia muuttamalla.

$R = 28\ \Omega, \quad L = 0{,}30\ \text{H}, \quad C = 24\ \mu\text{F}, \quad f = 50\ \text{Hz}, \quad U = 12\ \text{V}$

a) Piirin impedanssi on

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}$$

$$= \sqrt{(28\ \Omega)^2 + \left(2\pi \cdot 50\ \text{Hz} \cdot 0{,}30\ \text{H} - \frac{1}{2\pi \cdot 50\ \text{Hz} \cdot 24\ \mu\text{F}}\right)^2}$$

$$= 47{,}50923\ \Omega \approx 48\ \Omega.$$

b) Vaihtovirran tehollinen arvo on

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{12\ \text{V}}{47{,}50923\ \Omega} \approx 0{,}25\ \text{A}.$$

c) Vaihtovirralla on suurin tehollinen arvo, kun impedanssilla on pienin arvo. Vaihtovirran suurimman arvon saavuttamiseksi säädetään kondensaattorin kapasitanssia niin, että reaktanssi $X = X_L - X_C = 0$.

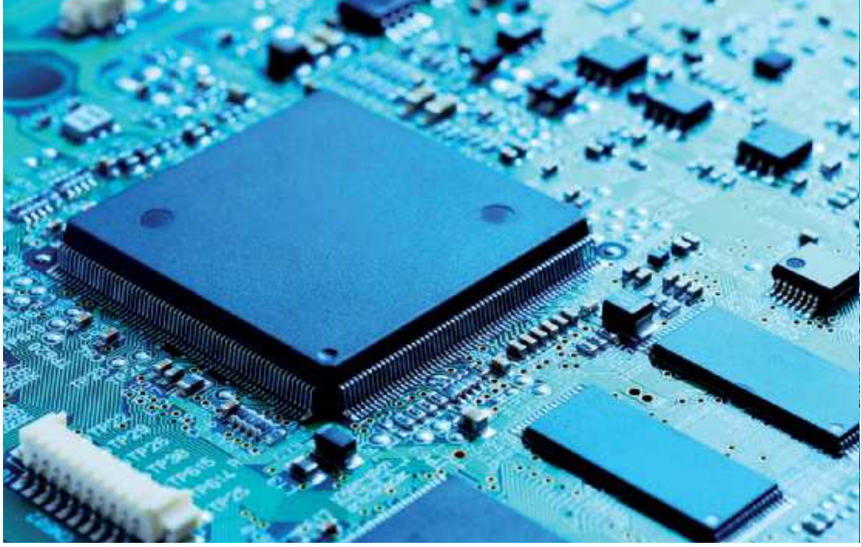
Vaihtovirran suurin tehollinen arvo on

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (0{,}0\ \Omega)^2}}$$

$$= \frac{U}{R} = \frac{12\ \text{V}}{28\ \Omega} \approx 0{,}43\ \text{A}.$$

Piirin impedanssi on 48 Ω. Vaihtovirran tehollinen arvo aluksi on 0,25 A ja suurin tehollinen arvo on 0,43 A.

Mitä tietoa muuntajan arvokilvestä saa?



Elektroniikkalaitteissa, joissa on mikropiirejä ja muistipiirejä, 230 V:n verkkojännite muutetaan tasasuuntaamalla esimerkiksi 10 V:n tasajännitteeksi.

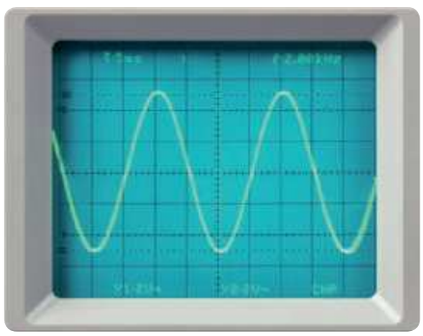
Vaihtovirran tasasuuntaus

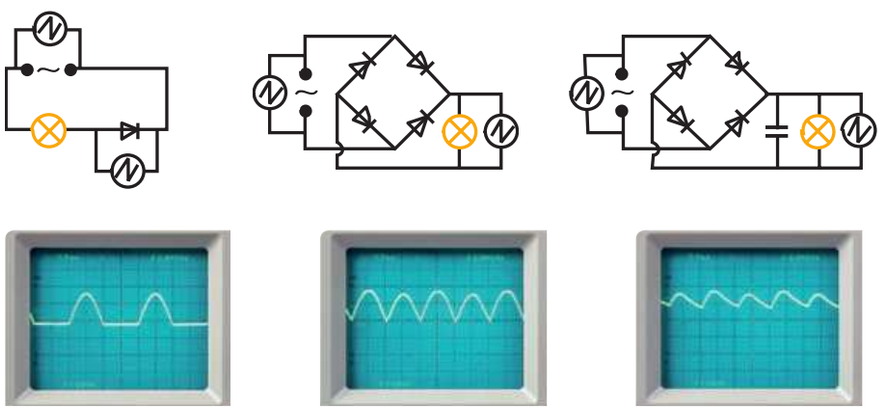
Suurin osa kotiemme sähkölaitteista toimii vaihtovirralla, mutta osa vaatii toimiakseen tasavirran. Tasavirtalaitteita varten sähköverkosta saatava vaihtovirta on muutettava tasavirraksi eli **tasasuunnattava**. Tämä voidaan tehdä diodien avulla (katso Fysiikka 6, s. 156). Tasavirralla toimivien pienelektroniikkalaitteiden verkkolaite on nykyään tavallisin vaihtovirran tasasuuntaaja. Verkkolaitteessa on muuntaja, joka alentaa jännitteen sopivaksi ja tasasuuntaa vaihtovirran. Muuntajan arvokilvessä mainitaan mm. verkkojännite, johon muuntaja voidaan kytkeä (esimerkiksi: Input 230 V~/21 mA/50 Hz), sekä muuntajan antama tasajännite ja -virta (esimerkiksi: Output 3,7 V ⎓/355 mA).

Oppilastyö ▪ Diodi ja vaihtovirta

Tutki diodin toimintaa oskilloskoopin avulla tekemällä seuraavat kytkennät.

Sinimuotoinen vaihtojännite.



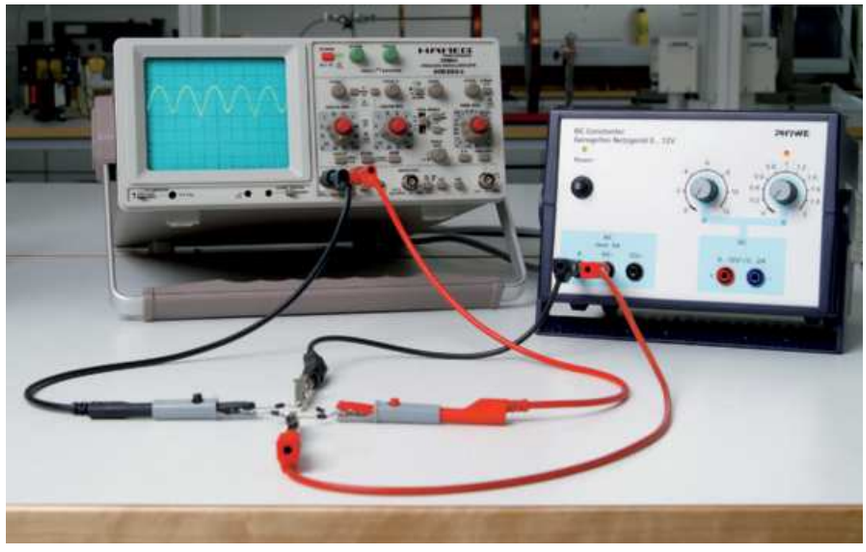


Oppilastyössä havaitaan, että kytkemällä diodeja sopivasti voidaan tasasuunnata vaihtovirtaa. Vasemmanpuoleinen kytkentä osoittaa, että sähkövirta kulkee diodin läpi vain yhteen suuntaan eli **päästösuuntaan**. Sähkövirta ei kulje **estosuunnassa**, jolloin lampun napojen välinen jännite on nolla.

Kun neljä diodia kytketään kuvan mukaisesti, sähkövirta saadaan kulkemaan lampun läpi aina samaan suuntaan riippumatta lähdejännitteen suunnasta. Tällaista neljän diodin muodostamaa kokonaisuutta sanotaan **tasasuuntaussillaksi**.

Tasasuunnattua jännitettä nimitetään sykkiväksi tasajännitteeksi. Sähkövirta kulkee kuormana olevassa lampussa koko ajan samaan suuntaan, mutta sen suuruus vaihtelee; virtaa sanotaan sykkiväksi tasavirraksi.

Kun tasasuuntaussiltaan kytketään kuorman rinnalle kondensaattori, tasasuunnatun jännitteen vaihtelut pienenevät. Jännitteen tasoittuminen perustuu kondensaattorin kykyyn varastoida energiaa vaihtovirtalähteestä ja luovuttaa sitä esimerkiksi kuormana olevalle lampulle.



Pohdi ja etsi

3-11. Miten a) vastuksen b) käämin c) kondensaattorin vaihtovirtaa vastustava ominaisuus muuttuu, kun vaihtovirran taajuus kasvaa?

3-12. a) Miten *RL*-vaihtovirtapiirin sähkövirta muuttuu, kun siihen kytketyn käämin sisälle laitetaan rautasydän?
b) Kun vaihtovirtapiirissä on vain vastus, vastuksen päiden välinen jännite ja sähkövirta ovat samanvaiheisia. Miksi vaihe-eroa ei ole?

3-13. Miten *RC*-piirin sähkövirta muuttuu, kun piirissä olevan säätökondensaattorin kapasitanssia suurennetaan? Perustele vastauksesi.

3-14. Kondensaattori on kytketty vaihtojännitegeneraattoriin, jonka taajuutta voidaan säätää. Miten virtapiirin sähkövirta muuttuu, kun vaihtovirran taajuus kasvaa nollasta hyvin suureksi?

3-15. a) Vaihtovirtapiirissä on sarjassa vastus, käämi ja säätökondensaattori. Miksi kondensaattoria säätämällä saadaan virtapiirin sähkövirta muuttumaan?
b) Vaihtovirtapiiriin on kytketty sarjaan vastus, käämi ja kondensaattori. Miten piirin impedanssiin vaikuttaa se, että vastuksen resistanssi, käämin induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi suurenevat yhtä aikaa?

Tehtäviä

3-16. Käämi kytketään vaihtojännitelähteeseen, jonka tehollinen jännite on 230 V ja taajuus 50 Hz. Käämin induktanssi on 0,35 H ja resistanssi pieni. Laske käämissä kulkeva
a) tehollinen sähkövirta
b) sähkövirran huippuarvo
c) pienin sähkövirta.

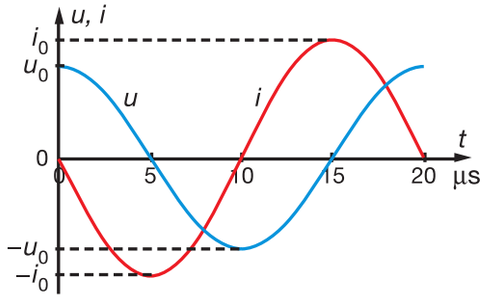
3-17. Induktanssin määrittämiseksi käämi kytkettiin ensin 20,0 V:n tasajännitteeseen. Sähkövirta oli silloin 5,0 A. Sitten käämiin kytkettiin vaihtojännite, jonka tehollinen arvo oli 230 V ja taajuus 50 Hz. Nyt käämissä kulki 3,0 A:n sähkövirta. Kuinka suuri oli käämin induktanssi?

3-18. 47 μF:n kondensaattori kytketään signaaligeneraattoriin. Kondensaattorin levyjen välisen jännitteen huippuarvo on 0,71 V. Laske piirissä kulkevan vaihtovirran huippuarvo, kun jännitteen taajuus on 2,8 kHz ja piirin resistanssi oletetaan nollaksi.

3-19. Vaihtovirtapiirin tehollinen jännite on 230 V ja taajuus 50 Hz. Siihen kytketään laite, jonka sähkövirtaa rajoittaa vain kondensaattori. Sulake kestää korkeintaan 10,0 A:n tehollisen sähkövirran. Arvioi kapasitanssin suuruutta. Miksi sähkövirran rajoittamiseen käytetään vastuksia eikä kondensaattoreita?

3-20. Kondensaattori kytketään vaihtojännitegeneraattoriin, jonka jännitteen tehollinen arvo on 6,0 V. Oletetaan, että vaihtovirtapiirin resistanssi on pieni. Laske virtapiirin sähkövirran tehollinen arvo, kun kondensaattorin kapasitanssi on 12 μF ja vaihtojännitteen taajuus a) 50 Hz b) 1,0 kHz.

3-21. Piirissä on kondensaattori, jonka kapasitanssi on 0,47 μF. Piirin resistanssi on pieni. Vaihtovirran huippuarvo on 55 mA.
a) Laske piirin impedanssi.
b) Laske piirissä kulkevan vaihtovirran tehollinen arvo.
c) Kuinka suuri on kondensaattorin jännitehäviön huippuarvo?
d) Millä hetkillä kondensaattorin jännitehäviöllä on huippuarvo?



3-22. Kondensaattori ja vastus kytkettiin vaihtojännitelähteen kanssa *RC*-piiriksi. Komponenteissa tapahtuvat jännitehäviöt mitattiin yleismittarilla, ja ne olivat $U_R = 5{,}0$ V ja $U_C = 3{,}6$ V.
a) Piirrä vastuksen ja kondensaattorin jännitehäviö ajan funktiona.
b) Miten vastuksen jännitehäviö muuttuu, kun vaihtojännitteen taajuutta suurennetaan (napajännite pysyy vakiona)?

3-23. Kondensaattorin kapasitanssi on 10 nF.
a) Laske kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi, kun vaihtojännitteen taajuus saa seuraavat arvot: 10 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1,0 kHz.
b) Piirrä kohdan a avulla (f, X_C)-kuvaaja.
c) Mitä johtopäätöksiä voit tehdä tuloksista?

3-24. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 5,5 μF, kytkettiin vaihtovirtalähteeseen. Vaihtojännitteen taajuus pidettiin vakiona, mutta jännitteen suuruutta muutettiin. Piirissä kulkeva sähkövirta muuttui seuraavasti:

U/V	4,5	6,0	7,0	9,0	10,0
I/mA	12	16	19	25	27

Määritä käytetyn vaihtojännitteen taajuus sopivan graafisen esityksen avulla.

3-25. Vaihtojännitteen tehollinen arvo on 230 V ja taajuus 50 Hz. Jännitelähteeseen kytketään sarjaan vastus, jonka resistanssi on 250 Ω, ja kondensaattori, jonka kapasitanssi on 25 μF. Laske sähkövirran tehollinen arvo, suurin arvo ja pienin arvo.

3-26. a) Esitä fysikaalinen perustelu sille, että vaihtovirtapiirissä oleva kondensaattori ei kuluta energiaa.
b) Kun erään kahvinkeittimen lämpölevy on kytketty verkkojännitteeseen (230 V, 50 Hz), sen tehonkulutus on 180 W. Levyn tehonkulutus halutaan pienentää puoleen kytkemällä lämmitysvastuksen kanssa sarjaan kondensaattori. Kuinka suuri tulee kondensaattorin kapasitanssin olla? [K2001, 14]

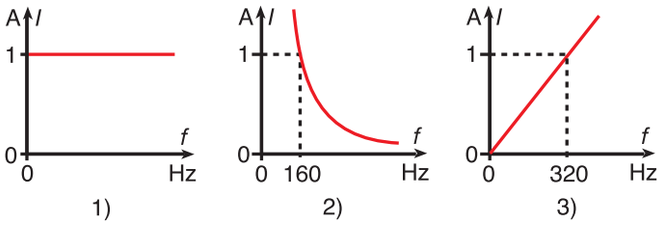
3-27. Vastuksen resistanssi, käämin induktiivinen reaktanssi ja kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi ovat kukin 150 Ω. Komponentit on kytketty sarjaan jännitelähteeseen, jonka tehollinen jännite on 230 V.
a) Kuinka suuri on näiden sarjaan kytkettyjen komponenttien yhteinen vaihtovirran kulkua vastustava vaikutus?
b) Laske piirissä kulkevan vaihtovirran tehollinen arvo.

3-28. Vastuksen resistanssi on 50 Ω, käämin induktanssi on 0,16 H, ja kondensaattorin kapasitanssi on 32 μF. Komponentit kytketään sarjaan vaihtovirtapiiriin. Jännitelähteen taajuus on 50 Hz ja tehollinen jännite 110 V. Laske
a) piirissä kulkevan sähkövirran tehollinen arvo
b) kunkin komponentin aiheuttama tehollinen jännitehäviö.

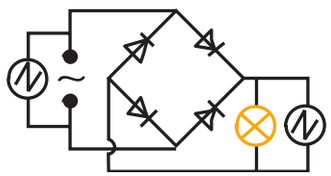
3-29. Kondensaattori (kapasitanssi $C = 5{,}2\ \mu\text{F}$) ja käämi (induktanssi L, sisäinen resistanssi R_L) on kytketty sarjaan vaihtojännitteeseen, jonka tehollinen jännite on 2,48 V ja taajuus on säädettävissä. Kun taajuus on 1,0 kHz, sähkövirta saavuttaa suurimman tehollisen arvon 0,512 A.
a) Mikä on käämin sisäisen resistanssin arvo, kun piiri on muuten likimain resistanssiton?
b) Mikä on käämin induktanssin arvo?
c) Kuinka suuri sähkövirran tehollinen arvo on, kun taajuus on 4,0 kHz?

3-30. Vaihtovirtapiirin vaihe-ero voidaan määrittää myös yhtälöstä $\tan\varphi = \dfrac{X_L - X_C}{R}$.
a) Vaihtojännitteen tehollinen arvo on 230 V ja taajuus 50 Hz. Jännitelähteeseen kytketään sarjaan vastus, jonka resistanssi on 250 Ω, ja kondensaattori, jonka kapasitanssi on 25 μF. Laske jännitteen ja sähkövirran välinen vaihe-ero.
b) Vaihtovirran taajuus on 50 Hz. Käämin induktanssi on 0,45 H ja kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi 35 Ω. Piiriin kytketyn vastuksen resistanssi on 120 Ω. Komponentit on kytketty sarjaan. Kuinka suuri on jännitteen ja sähkövirran välinen vaihe-ero?

3-31. Sähköopin oppilastöissä tutkittiin vastusta, kondensaattoria ja käämiä. Käämin resistanssi havaittiin hyvin pieneksi. Kun mitattiin kunkin komponentin läpi kulkevan vaihtovirran taajuusriippuvuus, saatiin oheisten kuvien mukaiset tulokset. Kaikissa mittauksissa jännitteen tehollinen arvo oli 7,5 V.
a) Liitä komponentit kuviin 1, 2 ja 3. Perustele vastauksesi.
b) Määritä vastuksen resistanssi, kondensaattorin kapasitanssi ja käämin induktanssi.
c) Hahmottele $I = I(f)$ -kuvaajan muoto, kun sarjaan kytketyt komponentit on yhdistetty 7,5 V:n vaihtojännitteeseen.



3-32. Piirrä kuvaan sähkövirran kulku jännitelähteen positiivisesta navasta negatiiviseen napaan, kun kuvassa jännitelähteen
a) ylempi napa on positiivinen
b) alempi napa on positiivinen.

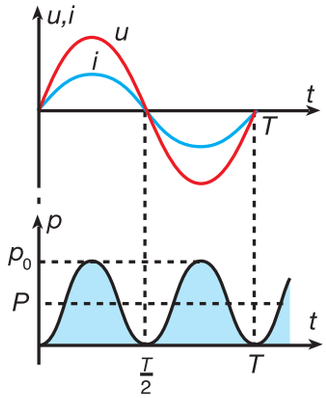


Sähkötuolia on käytetty Yhdysvalloissa teloitusvälineenä vuodesta 1890 alkaen. Sähkötuoli kytkettiin alun perin vaihtojännitteeseen, koska Edison halusi osoittaa vaihtovirran olevan vaarallisempaa kuin tasavirta.

3.3 Vaihtovirran teho

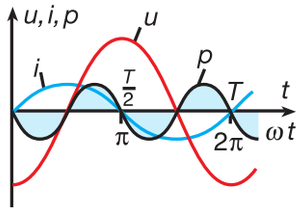
Usein sanotaan, että sähkölaite kuluttaa energiaa. Energia ei kuitenkaan kulu eli vähene sähkölaitteessa, vaan se muuntuu toiseen muotoon. Vaihtovirtapiiriä kuormittava sähkölaite muuntaa energiaa esimerkiksi sähkömoottorissa liike-energiaksi, hiustenkuivaajassa puhaltimen liike-energiaksi ja vastusten sisäenergiaksi tai lampussa säteily- ja sisäenergiaksi. Vaihtovirtalähteeseen kytketyn laitteen ottama teho riippuu jännitteestä, sähkövirrasta ja myös laitteen aiheuttamasta jännitteen ja sähkövirran välisestä vaihe-erosta.

Tutkitaan seuraavaksi, mitkä seikat vaikuttavat vaihtovirtapiirissä laitteen tehonkulutukseen.



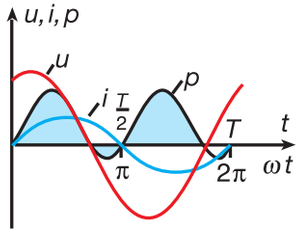
1) Oletetaan, että kuormittavalla laitteella on vain **resistanssia** (esimerkiksi vastus). Tällöin laitteen läpi kulkeva sähkövirta i ja laitteen jännitehäviö u ovat samassa vaiheessa eli vaihe-ero on nolla. Keskimääräinen tehonkulutus on $P = UI = \frac{u_0}{\sqrt{2}}\frac{i_0}{\sqrt{2}} = \frac{u_0 i_0}{2} = \frac{p_0}{2}$. Väritetty ala kuvaa laitteen tehonkulusta. Laite lämpenee, ja energiaa muuntuu laitteen (vastuksen) sisäenergiaksi.

2) Oletetaan, että kuormittavalla laitteella ei ole resistanssia ($R \approx 0\,\Omega$) mutta sillä on **induktanssia tai kapasitanssia**. Tällöin laitteen jännitehäviön ja laitteen läpi kulkevan sähkövirran välisen vaihe-eron itseisarvo on $|\varphi| = \frac{\pi}{2}\text{rad}\ (= 90°)$.



Aika-akselin yläpuolella oleva fysikaalinen pinta-ala kuvaa energian siirtymistä sähköverkosta laitteeseen ja alapuolella oleva osa energian siirtymistä laitteesta sähköverkkoon. Energian kokonaissiirtymä jakson T aikana ja pitkällä aikavälillä on likimain nolla. Kun vaihtovirtapiirissä on vain kondensaattori tai lähes resistanssiton käämi, sähkövirta ei aiheuta piirin lämpenemistä eli piirin energiaa ei muunnu sisäenergiaksi. Keskimääräinen sähköteho P on likimain nolla. Kondensaattori ja ideaalinen käämi eivät siis kuluta energiaa vaihtovirtapiirissä.

3) Oletetaan, että vaihtovirtapiiriä kuormittavalla laitteella on **resistanssia sekä induktanssia tai kapasitanssia tai kaikkia näitä.** Tällöin vaihe-ero φ on itseisarvoltaan nollan ja $\frac{\pi}{2}$ radiaanin välillä.



Kuvassa aika-akselin yläpuolella oleva fysikaalinen pinta-ala kuvaa sähköverkosta laitteeseen siirtyvää energiaa ja akselin alapuolella oleva osa laitteesta verkkoon palautuvaa energiaa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaihtovirtapiirissä kuluttavat energiaa ne komponentit, joilla on resistanssia. Tällaisia komponentteja ovat vastukset, mutta myös käämillä on resistanssia.

Vaihtovirtalaitteen teho

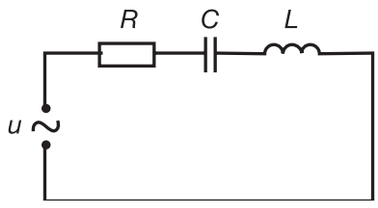
Vaihtovirtalaite ottaa vaihtovirtapiiristä tehon

$$P = UI\cos\varphi.$$

Kertoimesta $\cos\varphi$ käytetään nimitystä tehokerroin. Kulma φ on laitteen jännitehäviön ja laitteessa kulkevan sähkövirran välinen vaihe-ero.

Vaihtovirtalaitteen ottamaa tehoa kutsutaan **pätötehoksi**. Sen yksikkö on 1 W. Pätöteho ilmaisee, kuinka nopeasti laite muuntaa sähköverkon siirtämää energiaa toiseen muotoon, esimerkiksi sähkömoottori mekaaniseksi energiaksi ja sisäenergiaksi. Sähkönkuluttajan sähkölasku syntyy tästä energiasta.

Esimerkki 5



Vaihtojännitelähteen taajuus on 50 Hz ja tehollinen jännite 12 V. Lähteen kanssa sarjaan kytketään vastus, jonka resistanssi on 22 Ω, käämi, jonka induktiivinen reaktanssi on 16 Ω, ja kondensaattori, jonka kapasitiivinen reaktanssi on 27 Ω. Laske pätöteho, kun tehokerroin on 0,89.

$U = 12\ \text{V}, \quad f = 50\ \text{Hz}, \quad R = 22\ \Omega, \quad X_L = 16\ \Omega,$
$X_C = 27\ \Omega, \quad \cos\varphi = 0{,}89$

Tapa 1
Vaihtovirtapiirin impedanssi on

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
$$= \sqrt{(22\ \Omega)^2 + (16\ \Omega - 27\ \Omega)^2} \approx 24{,}59675\ \Omega.$$

Vaihtovirtapiirissä kulkeva sähkövirta on

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{12\ \text{V}}{24{,}59675\ \Omega} \approx 0{,}4878693\ \text{A}$$

ja piirin pätöteho

$$P = UI\cos\varphi = 12\ \text{V} \cdot 0{,}4878693\ \text{A} \cdot 0{,}89 \approx 5{,}2\ \text{W}.$$

Pätöteho on 5,2 W.

Tapa 2
Pätöteho ilmaisee, kuinka nopeasti piiri muuntaa sähkön siirtämää energiaa muodosta toiseen. Toisaalta piirissä vain resistanssi aiheuttaa energian muuntumista sisäenergiaksi, ja tämä tapahtuu teholla $P = RI^2 = 22\ \Omega \cdot (0{,}4878693\ \text{A})^2 \approx 5{,}2\ \text{W}$.

Pätöteho on 5,2 W.

Tehtäviä

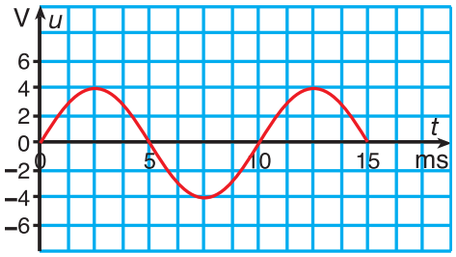
3-33. Hiustenkuivaajan teho 230 V:n sähköverkkoon kytkettynä on 850 W. Oletetaan, että sähkövirran kulkua vastustaa vain lämmitysvastuksen resistanssi. Hiustenkuivaajan huipputeho ja lämmitysvastuksen resistanssi ovat
1) 850 W ja 0,35 Ω 2) 1700 W ja 0,35 Ω
3) 1700 W ja 62 Ω 4) 850 W ja 81 Ω.

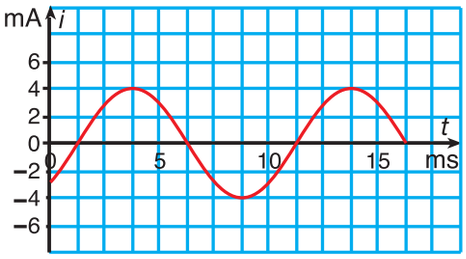
3-34. Sähkölämmittimessä on merkintä 900 W, 230 V ∼. Sähkövirran kulkua vastustaa vain lämmittimenä olevan vastuksen resistanssi.
a) Laske
1) tehollinen sähkövirta
2) sähkövirran huippuarvo
3) lämmittimen resistanssi
4) sähkövirran ja jännitehäviön välinen vaihe-ero.
b) Arvioi, kuinka paljon sähkön käytöstä tulee kustannuksia vuorokaudessa, jos 1 kWh maksaa 0,15 €.

3-35. Laite koostuu vastuksesta, jonka resistanssi on 200 Ω, ja käämistä, jonka induktiivinen reaktanssi on 150 Ω ja resistanssi pieni. Vaihtojännitteen taajuus on 60 Hz ja tehollinen napajännite 120 V. Piirin tehokerroin on $\cos\varphi = 0{,}80$.
a) Laske vaihe-ero ja selitä, mistä vaihe-ero johtuu.
b) Laske vaihtovirran tehollinen arvo.
c) Laske laitteen kuluttama pätöteho.

3-36. Sähkömoottori kytketään 230 V:n sähköverkkoon. Moottorin pätöteho on 1200 W ja tehokerroin 0,85. Laske moottorin
a) läpi kulkevan sähkövirran tehollinen arvo
b) resistanssi
c) impedanssi ja reaktanssi.
Sähkömoottorissa on käämi. Oletetaan, että moottorin kapasitiivinen reaktanssi on pieni.

3-37. Vastus ja eräs muu komponentti kytkettiin sarjaan vaihtovirtapiiriksi. Jännitelähteen napajännitteen ja piirin sähkövirran kuvaajat ovat seuraavat:





a) Onko vastuksen kanssa sarjaan kytketty komponentti kondensaattori vai käämi?
b) Määritä vaihe-ero.
c) Laske piirin tehonkulutus.

3-38. Teholtaan 1,5 kW:n sähkömoottori on kytketty 220 V:n vaihtovirtaverkkoon. Laske moottorin ottaman sähkövirran tehollisarvo ja huippuarvo, kun jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero on 22°.

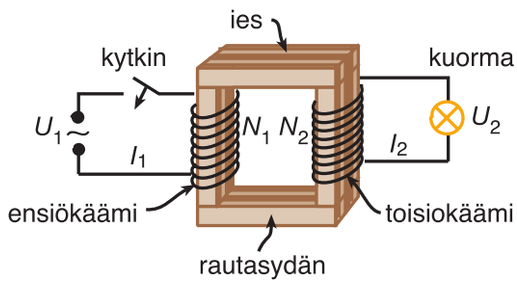
3-39. Käämi, jonka induktanssi on 0,10 H ja resistanssi 12 Ω, kytkettiin 110 V/60 Hz vaihtojännitteeseen. Piiriin kytketty tehomittari näytti keskimääräiseksi tehonkulutukseksi 93 W. Laske vaihe-ero.

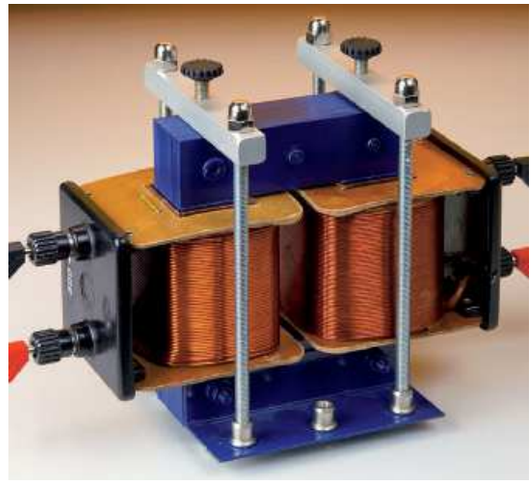
Matka-adapteri erilaisiin sähköjärjestelmiin.

3.4 Muuntaja

Energiansiirrossa käytetään korkeita jännitteitä (ks. s. 139). Siksi voimalaitoksen generaattorin tuottama jännite kohotetaan muuntajalla korkeaksi energiansiirtoa varten. Kuluttajien tarpeisiin sopivaksi jännite alennetaan taas muuntajilla. Pieniä muuntajia käytetään sähköverkon vaihtojännitteen alentamiseen myös useissa kodin laitteissa, esimerkiksi kännyköiden latauslaitteissa, tietokoneen verkkolaitteessa ja monissa valaisimissa.

Muuntajassa on kaksi käämiä **kytketty induktiivisesti** (ks. s. 56) yhteisen suljetun rautasydämen ympärille. Vaihtojännitelähteeseen kytkettyä käämiä, jonka kierrosluku on N_1, sanotaan **ensiökäämiksi** eli primaarikäämiksi. Muuntajaa kuormittavan sähkölaitteen kuormituksen puoleista käämiä kutsutaan **toisiokäämiksi** eli sekundaarikäämiksi. Sen kierrosluku on N_2.





VAIN OPETTAJA SAA TEHDÄ MUUNTAJAN KYTKENTÖJÄ JA MITTAUKSIA.

Työ ▪ Muuntaja

Rakenna kuvan mukainen kytkentä kahdesta käämistä, U-rautasydämestä ja ikeestä. Käytä käämejä, joissa on sama kierrosluku.

1. Kytke ensiöpuolelle aluksi tasajännite. Käytä lampun nimellisjännitteen suuruista jännitettä. Hehkuuko lamppu, kun tasajännite on kytkettynä?

2. Kytke ensiöpuolelle vaihtojännite ja tarkkaile lamppua.

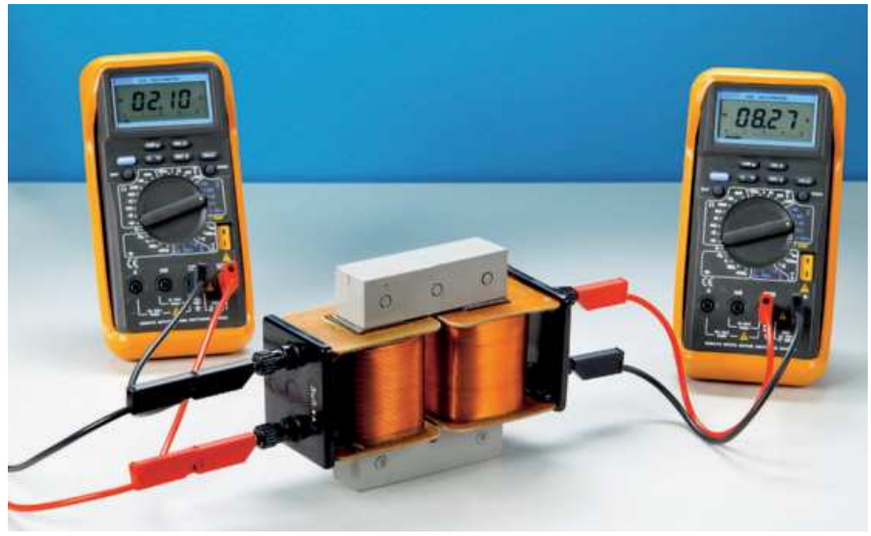
Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Ensiöpuolen käämin muuttuva vaihtovirta synnyttää muuttuvan magneettikentän, joka osittain läpäisee toisiokäämin. Toisiopuolen käämin sisällä muuttuva magneettivuo indusoi käämin päiden välille jännitteen, jolloin suljetussa virtapiirissä kulkee sähkövirta. Muuntajan rautasydän vahvistaa kenttää.

Muuntajan ensiökäämin kunkin silmukan sähkövirta aiheuttaa rautasydämeen yhtä voimakkaan magneettikentän, ja magneettikenttien summa on kokonaiskentän voimakkuus. Vastaavasti toisiopuolella muuttuva magneettivuo indusoi käämin kuhunkin silmukkaan yhtä suuren jännitteen, ja jännitteiden summa on käämin päiden välinen jännite. Rautasydämen poikkileikkauksen läpäisevä magneettivuo on likimain yhtä suuri kaikkialla rautasydämen sisällä. Magneettikenttä välittää rautasydämen avulla energiaa ensiöpuolelta toisiopuolelle lähes häviöttömästi.

Työn kohdassa 1 tasajännite synnyttää ensiökäämiin vakiona pysyvän tasavirran. Tällöin rautasydämen sisällä on muuttumattomana pysyvä magneettivuo, joka ei aiheuta induktioilmiötä toisiokäämissä. Toisiokäämissä ei kulje sähkövirta ja lamppu ei hehku. Työn kohdassa 2 muuntajaan on kytketty vaihtojännite, jolloin toisiopuolen lamppu hehkuu.

Työ ▪ Muuntajan käämien kierrosluvut

1. Rakenna muuntaja, jossa on ensiöpuolella 300 kierrosta ja toisiopuolella 600 kierrosta. Kytke volttimittari sekä ensiö- että toisiopuolelle. Kytke ensiöpuoli säädettävään vaihtojännitelähteeseen.
Muuta muuntajan ensiöpuolen jännitettä ja mittaa molempien puolien napajännite jokaisessa kytkennässä.
2. Rakenna vielä kolme erilaista muuntajaa. Käytä esimerkiksi 300-, 600- ja 1200-kierroksisia käämejä vuorotellen ensiö- ja toisiopuolella. Toista kohdan 1 mittaukset.



Ensiökäämissä magneettivuo muuttuu siinä kulkevan vaihtovirran takia. Suljetun rautasydämen vuoksi lähes sama, muuttuva magneettivuo $\Phi = \Phi(t)$ lävistää molemmat käämit. Ensiöpuolen jännite on e_1. Toisiopuolelle indusoituu jännite e_2. Sekä ensiö- että toisiopuolen jännite on käämien yksittäisiä johdinkierroksia vastaavien jännitteiden summa, joten $e_1 \approx -N_1 \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ja $e_2 \approx -N_2 \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Jaetaan yhtälöt puolittain, jolloin induktiojännitteille ja kierrosluvuille saadaan verranto $\dfrac{e_1}{e_2} \approx \dfrac{N_1}{N_2}$.

N_1/r	N_2/r	U_1/V	U_2/V
300	600	1,5	3,0
300	600	5,0	10
300	1200	2,0	8,0
300	1200	4,0	16
600	300	8,0	4,0
600	300	12	6,0
1200	300	6,0	1,5
1200	300	10,0	2,5

Taulukossa on napajännitteen arvot, jotka työssä mitattiin erilaisia muuntajia käytettäessä. Oppilastyöstä huomataan, että käämien napajännitteet suhtautuvat mittaustarkkuuden rajoissa toisiinsa kuten ensiö- ja toisiopuolen käämien kierrosluvut eli $\dfrac{U_1}{U_2} \approx \dfrac{N_1}{N_2}$.

Jos toisiopuolella on käämi, jonka kierrosluku on suurempi kuin ensiöpuolen käämin kierrosluku, jännite suurenee toisiopuolella. Vastaavasti jos toisiopuolella on käämi, jonka kierrosluku on pienempi kuin ensiöpuolen käämin kierrosluku, jännite pienenee toisiopuolella.

Kun vaihtojännitelähteeseen, esimerkiksi sähköverkkoon, kytkettyä muuntajaa ei kuormiteta, toisiopuolen virtapiiri on avoin eikä siinä kulje sähkövirta. Muuntajan ensiöpuolella on vain pieniresistanssinen käämi, jossa sähkövirta kulkee. Käämin sisäenergian kasvu aiheuttaa muuntajan vähäistä lämpenemistä. Matkapuhelin voi ilmoittaa latauksen päätyttyä: ”Irrota latauslaite sähköverkosta energian säästämiseksi.” Ohjetta on hyvä nou-

Miksi latauslaite lämpenee matkapuhelimen akkua ladattaessa?

dattaa. Matkapuhelimen muuntaja ei ole ideaalinen muuntaja, joten sähköverkkoon kytketty laturi kuluttaa hieman energiaa, vaikka sitä ei käytettäisikään. Muuntajaa sanotaan ideaaliseksi muuntajaksi, jos oletetaan, että siinä ei tapahdu energiahäviöitä.

Kun muuntajan toisiopuolelle kytketään kuorma, piirin sähkövirta riippuu toisiopuolen jännitteestä ja kuormittavan piirin impedanssista. Toisiokäämin sähkövirta aiheuttaa rautasydämeen magneettivuon, jonka muutosnopeus on lähes yhtä suuri kuin ensiöpuolen magneettivuon muutosnopeus. Tämä toisiopuolen sähkövirran indusoima muuttuva magneettivuo pyrkii vastustamaan ensiöpuolen sähkövirran muuttumista. Tämän seurauksena ensiöpuoli ottaa vaihtojännitelähteestä energiaa samalla teholla kuin toisiopuoli siirtää sitä kuormittavaan laitteeseen. Jos muuntajan energiahäviöt ovat pienet, energian säilymislain mukaan ensiöpuolen generaattorista ottama energia on likimain yhtä suuri kuin toisiopuolen kuorman käyttämä energia eli $E_1 \approx E_2$. Kun ensiöpuoli ottaa energiaa keskimääräisellä teholla P_1 ja toisiopuolella energiaa siirtyy kuormaan keskimääräisellä teholla P_2, saadaan yhtälö $P_1 t \approx P_2 t$, joten $P_1 \approx P_2$.

Kuormitettuun muuntajaan syntyy ensiö- ja toisiopuolelle sähkövirran ja jännitteen välille vaihe-erot φ_1 ja φ_2. Ensiö- ja toisiopuolen tehot ovat kuitenkin likimain yhtä suuret, joten $U_1 I_1 \cos\varphi_1 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$. Koska vaihe-erot φ_1 ja φ_2 ovat yleensä likimain yhtä suuret, saadaan yhtälö $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ eli $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$. Kun jännitteiden ja johdinkierroslukujen välinen suureyhtälö otetaan huomioon, saadaan $\frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$. Ideaalisella muuntajalla tarkoitetaan laitetta, jossa ei ole tehohäviöitä.

Ideaalinen muuntaja
Ideaalisen muuntajan muuntosuhde on

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

jossa N_1 ja N_2 ovat ensiö- ja toisiopuolen kierrosluvut ja U_1 ja U_2 sekä I_1 ja I_2 ovat ensiö- ja toisiopuolen jännitteen ja sähkövirran teholliset arvot.

Käytännössä muuntajan tehohäviöt ovat muutamia prosentteja. Muuntajat lämpenevät rautasydämen pyörrevirtojen ja hystereesin (rautahäviöt) sekä käämien resistanssin (kuparihäviöt) takia. Siksi suuria muuntajia on jäähdytettävä. Lämpenemisestä johtuvat häviöt saadaan pieniksi, kun käytetään paksuja johtimia, joiden resistiivisyys on pieni. Pyörrevirtojen aiheuttamaa lämpenemistä estetään rakentamalla muuntajan rautasydän toisistaan eristetyistä ohuista levyistä. Jäännösmagnetismista (hystereesi) aiheutuvia häviöitä voidaan pienentää käyttämällä magneettisesti pehmeää rautasydäntä, sillä sen hystereesisilmukka on kapea.

Muuntajan hyötysuhde
Muuntajan hyötysuhde on

$$\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}},$$

jossa P_{anto} on toisiopuolen antama teho ja P_{otto} ensiöpuolen ottama teho.

Lasten autorata kytketään verkkojännitteeseen, mutta turvallisuussyistä radan käyttöjännite alennetaan muuntajalla esimerkiksi 12 V:iin.

Esimerkki 6

Muuntaja kytketään 230 V:n ja 50 Hz:n sähköverkkoon. Toisiopiiri on kytketty moottoriin, jolloin toisiojännite on 13,5 V ja toisiovirta 0,55 A. Kun moottori on käynnissä, toisiopiirin tehokerroin on 0,84. Laske

a) moottorin ottama teho

b) muuntajan ottama teho, kun sen hyötysuhde on 92 %.

$U_1 = 230\ \text{V}, \quad U_2 = 13{,}5\ \text{V}, \quad I_2 = 0{,}55\ \text{A}, \quad f = 50\ \text{Hz},$
$\cos\varphi = 0{,}84, \quad \eta = 0{,}92$

a) Muuntajasta siirtyy energiaa moottoriin teholla

$$\begin{aligned} P_2 &= U_2 I_2 \cos\varphi = 13{,}5\ \text{V} \cdot\ 0{,}55\ \text{A} \cdot 0{,}84 \\ &= 6{,}237\ \text{W} \approx 6{,}2\ \text{W}. \end{aligned}$$

Moottori muuntaa muuntajan antamaa energiaa tällä teholla esimerkiksi mekaaniseksi työksi ja sisäenergiaksi. Huomaa, että tehokerroin ei ole moottorin hyötysuhde.

Moottorin ottama teho on 6,2 W.

b) Muuntajan hyötysuhde on sen antaman ja ottaman tehon suhde $\eta = \dfrac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$, joten muuntajan ottama teho on $P_{\text{otto}} = \dfrac{P_{\text{anto}}}{\eta}$. Muuntajan antama teho on yhtä suuri kuin moottorin ottama teho, joten

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{6{,}237\ \text{W}}{0{,}92} \approx 6{,}8\ \text{W}.$$

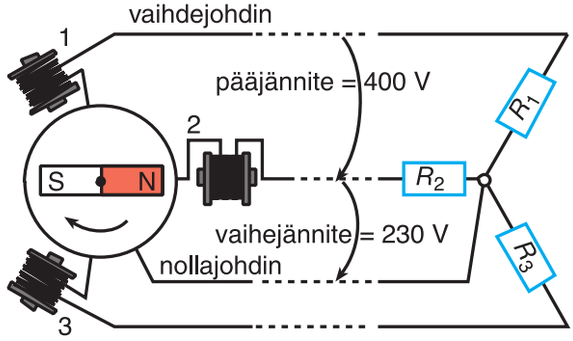
Muuntajan ottama teho on 6,8 W.

Kolmivaihevirta

Oppilastyö ▪ Kolmivaihegeneraattori
Aseta kolme rautasydämellä varustettua käämiä vaakasuoraan 120 asteen välein ympyrän kehälle. Kytke käämit volttimittareihin. Sijoita ympyrän keskipisteeseen herkästi laakeroitu kestomagneetti siten, että se pyörii jokaisen käämin lähellä. Pyöritä kestomagneettia ja seuraa volttimittareita.

Lähes kaikki sähköverkon vaihtovirta tuotetaan kolmivaihegeneraattorin avulla. Siinä on kolme generaattoria, jotka tuottavat erillistä sinimuotoista vaihtojännitettä. Muuttuva magneettivuo indusoi generaattorin käämeihin jännitteet, joiden välinen vaihe-ero on $\frac{2\pi}{3}$ $(120°)$.

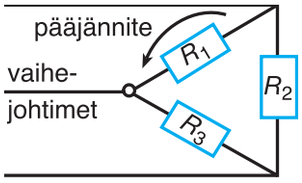
Oppilastyössä huomataan, että volttimittarien lukemat vaihtelevat jaksoittain magneetin pyörimisen tahdissa.



Kuvan tähtikytkennässä kolme vastusta on kytketty vaihejännitteeseen 230 V.

Kolmivaihevirtaa tuotettaessa käytetään kolmea ns. vaihejohdinta ja näiden lisäksi nollajohdinta. Nollajohdin yhdistää kunkin käämin toisen navan maahan. Käämistä lähtevä toinen johdin on jännitteellinen **vaihejohdin**. Teknisesti kolmivaihevirtaa tuotettaessa käytetään ns. **tähtikytkentää**, jossa käämien toiset päät on kytketty yhteiseen pisteeseen (tähtipisteeseen).

Suomessa ja useimmissa muissa maissa kotitalouksien nollajohtimen ja vaihejohtimen välinen tehollinen **vaihejännite** on 230 V, joka on pistorasian napojen välinen jännite. Vaihejännitteen huippuarvo on $\sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} \approx 330\ \text{V}$. Myös kotien valaisimet tai niiden muuntajat on kytketty vaihejännitteeseen. Kun joskus puhutaan ”valovirrasta”, tarkoitetaan tämän jännitteen aiheuttamaa sähkövirtaa.



Kuvan kolmiokytkennässä vastukset on kytketty vaihejohtimien välille.

Suuritehoiset laitteet, kuten saunan kiuas tai liesi, kytketään kolmivaihevirran eri vaiheisiin, jolloin jokaista vaihetta voidaan kuormittaa likimain yhtä paljon. Siksi niin kiukaalla kuin liedelläkin on sähkömittaritaulussa kolme sulaketta, yksi kullekin vaiheelle. Tällöin laitteet on kytketty kahden vaihejohdon väliseen jännitteeseen, jota kutsutaan **pääjännitteeksi** ja jonka tehollinen arvo on $\sqrt{3} \cdot 230\ \text{V} \approx 400\ \text{V}$. Vaihejännitteen huippuarvo on $\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 230\ \text{V} \approx 560\ \text{V}$. Joskus puhutaan ”voimavirrasta”. Sillä tarkoitetaan pääjännitteeseen kytketyn laitteen käyttämää sähkövirtaa.

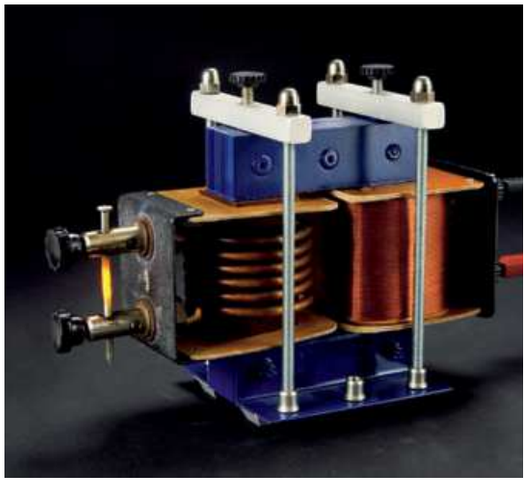
Saunan kiukaan teho on niin suuri, että kiuas on kytkettävä 400 V:n ”voimavirtaan”.

Kolmivaihemoottorin toiminta on kolmivaihegeneraattorin toiminnalle käänteinen. Käämien keskellä oleva alumiinisylinteri alkaa pyöriä tai kellolasilla olevat kuulat alkavat kiertää ympyrän kehää, jos kuhunkin käämiin johdetaan kolmivaihevirran yksi vaihe.

Tehtäviä

Seuraavissa tehtävissä muuntajat oletetaan häviöttömiksi, ellei muuta ole mainittu.

3-40. a) Miksi kännykän latauslaitetta ei ole syytä pitää pistorasiassa enää sen jälkeen, kun kännykkä on latautunut?
b) Miksi muuntajan sydän valmistetaan ohuista päällekkäisistä toisistaan eristetyistä rautalevyistä eikä yhtenäisestä rautakappaleesta?

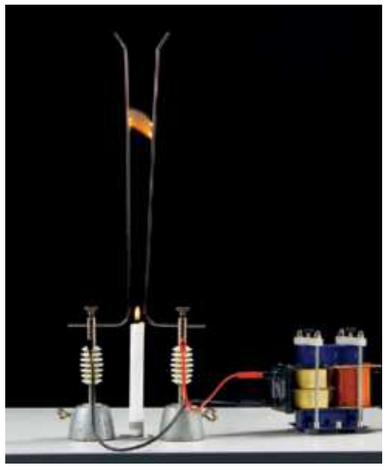


3-41. Eräässä koulukokeessa muuntajan ensiökäämiin ($N = 600$) kytkettiin 230 V:n jännite. Tällöin toisiokäämin ($N = 6$) napojen väliin kytketty rautanaula alkoi hehkua ja suli poikki.
a) Ensiökäämissä kulkeva sähkövirta oli I. Päättele sähkövirta toisiopuolen käämissä.
b) Rautanaulan paikalle kytkettiin pieni taskulampun polttimo, joka valaisi normaalisti. Selitä, miksi naula suli mutta polttimo kesti.

3-42. Muuntaja kytketään pistorasiaan, joka antaa 230 V:n jännitteen ensiöpuolelle. Kuinka suuri ensiöpuolen käämin kierrosluku on, kun toisiopuolen kierrosluku on 10 ja toisiojännite 9,0 V?

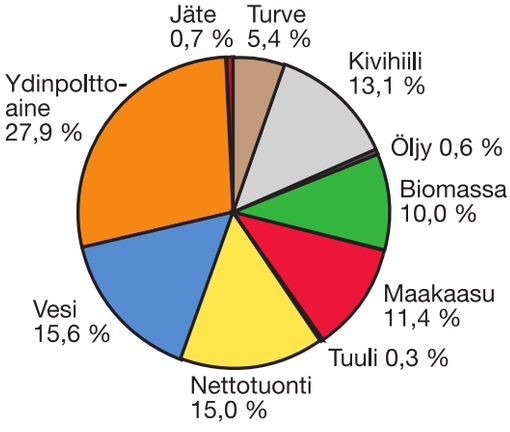
3-43. Muuntajan toisiopuolen sähkövirraksi halutaan 3,5 A, kun toisiopuolen jännite on 15 V. Ensiöpuolen sähkövirta on 16 A. Ensiöpuolen jännite on 1) 3,3 V 2) 69 V 3) 53 V.

3-44. Kuvassa on Jaakobin tikapuina tunnettua koelaitteisto. Muuntajan ensiöpuolella on 600 kierrosta ja toisiopuolella 12 000.
a) Ensiöpuolen jännite on 230 V. Laske jännite toisiopuolella.
b) Selitä valokaaren synty, kun elektrodien välissä on palava kynttilä.



3-45. Muuntajan ensiökäämi on kytketty verkkojännitteeseen. Toisiokäämi on kytketty sähköautorataan. Muuntajan kierroslukujen suhde on 12:1, ja muuntaja ottaa sähköverkosta 57 W:n tehon. Tällöin toisiokäämissä kulkeva sähkövirta on 2,6 A ja vaihe-ero 0,84 rad. Laske muuntajan hyötysuhde.

3-46. Saunan kiuas on kytketty sähköverkon pääjännitteeseen.
a) Kuinka suuri on kiukaan sähkövastuksissa kulkevan sähkövirran tehollinen arvo, kun vastusten teho on yhteensä 6,0 kW?
b) Kuinka suuri sähkövirta olisi, jos vastukset olisi kytketty vaihejännitteeseen?
c) Kuinka suuren sähkövirran korkeintaan kestää kodin sähkötaulun kiukaaseen kytketty sulake tai suojarele?



Eri energialähteiden osuus Suomen sähkönhankinnasta vuonna 2009.

Sähköntuotanto

Energiaa tarvitaan yhteiskunnassa erilaisten koneiden ja laitteiden käyttövoimaksi, lämmitykseen, valaistukseen ja kuljetukseen. Suuri osa energiasta siirretään nykyään sähkön avulla. Suuria sähkön kuluttajia ovat mm. puunjalostusteollisuus ja metalliteollisuus. Sähkön käyttö kotitalouksissa on lisääntynyt mm. viihde-elektroniikkalaitteiden myötä. Suomessa tärkeimmät sähköntuotannon energialähteet ovat ydinpolttoaine (uraani), virtaava vesi, kivihiili, maakaasu, biomassa (esimerkiksi puu) ja turve. Tuulen käyttö sähköntuotannossa on lisääntymässä. Öljyn avulla sähköä tuotetaan varsin vähän.

Kivihiiltä, maakaasua, turvetta ja öljyä kutsutaan fossiilisiksi energialähteiksi, koska ne ovat syntyneet muinaisten kasvien ja pieneliöiden lahotessa hapettomissa olosuhteissa eli fossiloituessa. Niitä pidetään **uusiutumattomina luonnonvaroina**, koska niitä syntyy luonnossa lisää hyvin hitaasti. Turvetta kutsutaan joskus myös hitaasti uusiutuvaksi luonnonvaraksi, koska sitä syntyy luonnossa huomattavasti nopeammin kuin kivihiiltä, maakaasua ja öljyä. Fossiilisten energialähteiden energia on perimmältään kasvien yhteyttämisen kautta keräämää Auringon energiaa, joka puolestaan on syntynyt Auringossa tapahtuneissa atomiydinten yhdistymisissä eli fuusioissa. Fossiilisten energialähteiden haittana on niistä poltettaessa vapautuva hiilidioksidi, joka on ilmaston lämpenemistä aiheuttava kasvihuonekaasu.

Vesi ja tuuli ovat **uusiutuvia luonnonvaroja**, samoin biomassa. Niidenkin energia on perimmältään peräisin Auringosta. Osa Auringosta tulevasta energiasta pitää yllä maapallon vesikiertoa, osa muuttuu ilman liike-energiaksi ja osa sitoutuu yhteyttämisen kautta nopeasti uusiutuvaan kasvi- ja puumassaan.

Ydinvoimalaitoksissa tuotettu energia perustuu atomiytimien, tavallisesti uraanin, halkeamiseen eli fissioon. Uraani on – kuten öljy, kivihiili ja maakaasu – ehtyvä luonnonvara. Fuusioenergiasta eli ydinten yhdistymisestä syntyvästä energiasta toivotaan merkittävää tulevaisuuden energialähdettä.

Suomen sähköntuotannosta lähes kolmannes tapahtuu **yhteistuotantolaitoksissa**, joissa tuotetaan samalla lämmittämiseen käytettävää energiaa kaukolämpöverkkoa ja teollisuuden prosesseja varten. Polttoaineen energiasisällöstä saadaan tällä tavoin hyödynnettyä parhaimmillaan noin 90 %.

Energian siirto sähkön avulla

Voimalaitoksissa energialähteen energialla pyöritetään generaattorin turbiineja. Energia voi olla esimerkiksi veden, ilman tai höyryn liike-energiaa. Generaattori muuntaa turbiinien liike-energian sähköksi.

Sähköverkko koostuu kantaverkosta, alueverkosta ja jakeluverkosta. Osa kantaverkoista toimii 400 kV:n sijasta 110 kV:n tai 20 kV:n jännitteellä.

Voimalaitosten tuottamaa energiaa siirretään kuluttajille koko maan kattavan **sähköverkon** avulla. Energia siirtyy sähköjohtoja pitkin sähkövirran kuljettamana. Sähköverkko koostuu kantaverkosta, alueverkoista ja jakeluverkoista. Suurvoimaloista energiaa siirretään kantaverkkoon yleensä kolmivaihevirtana.

Voimalan generaattorien tuottama vaihtojännite (esimerkiksi 20 kV) kasvatetaan muuntajan avulla suurempaan arvoon (110 kV, 220 kV tai 400 kV), koska suuren jännitteen käyttö energian siirrossa aiheuttaa vähemmän siirtohäviötä kuin pienen jännitteen käyttö. Alueverkot, jotka jakavat sähköä esimerkiksi jonkin maakunnan alueella, toimivat 110 kV:n jännitteellä. Jakeluverkkojen jännitteet ovat yleensä 20 kV, 10 kV tai 0,4 kV. Varsinkin kaupungeissa suuri osa jakeluverkosta muodostuu maan alla kulkevista kaapeleista, muissa verkoissa käytetään pääasiassa ilmassa kulkevia avojohtoja.

Erijännitteiset verkot liittyvät toisiinsa sähköasemilla. Jakelumuuntamoissa korkeat siirtojännitteet muutetaan käyttäjille sopiviksi pienjännitteiksi.

Pienjänniteverkon jännite on 400 V. Kotitalouksien tuttu käyttöjännite 230 V on tämän pienjänniteverkon tehollinen vaihejännite. Siirtolinjojen sähkövirrat vaihtelevat sähkön käytön mukaan alueesta, vuodenajasta ja vuorokaudenajasta riippuen. Esimerkiksi 400 kV:n johtimissa virta on 50 A – 1200 A ja 110 kV:n johtimissa 10 A – 600 A.

Energiaa siirretään jonkin verran myös tasavirtana. Hyvin pitkillä matkoilla (yli 600 km) tasavirta on todettu vaihtovirtaa tehokkaammaksi siirtotekniikaksi. Tasavirtaa käytetään myös yhdistettäessä eri valtioiden sähköverkkoja toisiinsa.

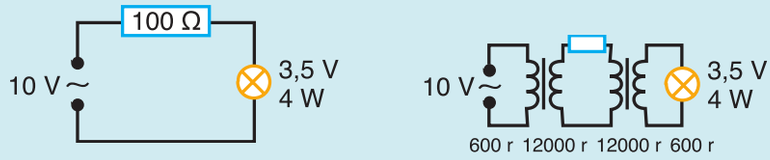
Vaihtovirtaverkkojen yhdistäminen ei ole mahdollista, jos verkkojen taajuudet eroavat toisistaan. Vaihtovirta muutetaan tasasuuntaajalla tasavirraksi ja vastaanottopäässä takaisin vaihtovirraksi. Tasavirtaa käytettäessä tarvitaan vain yksi johdin, koska maa tai vesi voi toimia toisena johtimena.

Tehohäviö energian siirrossa

Oppilastyö ▪ Tehohäviö energian siirrossa

1. Kytke lamppu ja vastus sarjaan vaihtojännitelähteen kanssa. Säädä jännitettä esimerkiksi 0 V:n ja 10 V:n välillä. Tutki lampun hehkumista.

2. Rakenna kuvan mukaiset muuntajat. Liitä muuntajien väliin sama vastus kuin kohdassa 1. Tutki jälleen lampun hehkumista.



Suomessa sähköverkon kautta siirretystä energiasta menee energian siirron aikana hukkaan noin 4 %. Hukkaenergia vastaa likimain yhden suurvoimalan tuottamaa energiaa. Tämä siirtohäviö aiheutuu pääasiassa sähköenergian muuntumisesta termiseksi energiaksi: johdot ja muut sähköverkon komponentit, kuten muuntajat, lämpenevät resistanssin takia ympäristöä korkeampaan lämpötilaan ja lämmittävät ympäristöä. Muita energiahäviökin syitä ovat vuotovirrat, kuten koronapurkaukset. Koronapurkaukset syntyvät suurjännitejohtojen ionisoidessa ympäröivää ilmaa ja tehdessä sen sähköä johtavaksi. Sähkövirtaa kulkee ilman kautta esimerkiksi pylväsrakenteisiin ja niistä maahan. Korkeajännitejohdoista varsinkin kostealla säällä kuuluva sirinä ja rätinä johtuu koronapurkauksista.

Sähkönjakelussa käytettäviä avojohtoja ja sähkökaapeli.

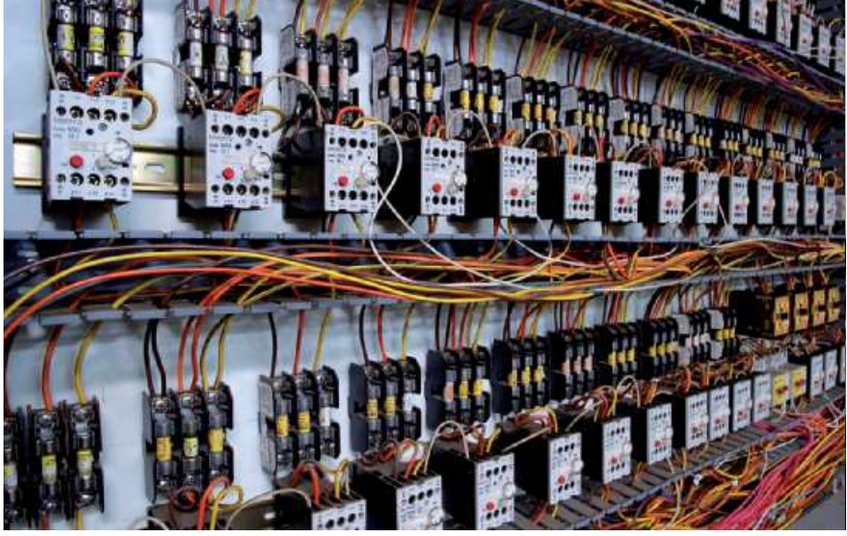
Siirtojohtojen resistanssista R_h aiheutuva jännitehäviö on $U_h = R_h I$, jossa I on siirtojohdoissa kulkeva sähkövirta. Joulen lain mukaan tehohäviö on $P_h = U_h I = R_h I^2$. Tehohäviö on siis sitä pienempi, mitä pienempiä virta I ja johtimen resistanssi R_h ovat. (Kertaa joulen laki, Fysiikka 6, s. 52.)

Voimalaitoksen generaattori tuottaa keskimääräisen sähkötehon $P = UI$, jossa U on generaattorin napajännite. Napajännite muunnetaan muuntajalla korkeammaksi siirtojännitteeksi U_s. Mitä korkeampaa siirtojännitettä U_s käytetään, sitä alhaisempi siirtovirta tarvitaan energian siirtämiseen teholla P.

Metallijohtimen resistanssi on $R = \rho l/A$, jossa ρ on johdinmetallin resistiivisyys, l johtimen pituus ja A johtimen poikkipinta-ala. Paksujen johtojen resistanssi on siis pienempi kuin samaa ainetta olevien ohuiden johtojen resistanssi, ja ne aiheuttavat siksi vähemmän tehohäviötä kuin ohuet johdot, mutta materiaalia kuluu vastaavasti enemmän. Tehohäviö siirtojohdossa on $P_h = R_h I^2 = R_h \dfrac{P^2}{U_k^2} = \rho \dfrac{l}{A} \cdot \dfrac{P^2}{U_k^2}$. Jos siirtojännite vaihtuu esimerkiksi 400 kV:sta 110 kV:iin, tehohäviön pitäminen muuttumattomana vaatisi johtimen poikkipinta-alan kasvattamista tekijällä $\left(\dfrac{400\ \text{kV}}{110\ \text{kV}}\right)^2 \approx 13$. Johdin, jonka poikkipinta-ala on 1 cm^2, pitäisi silloin korvata johtimella, jonka poikkipinta-ala on 13 cm^2.

Metallit, joiden resistiivisyys on pieni, kuten kulta ja kupari, ovat kalliita. Niitä käytetään elektroniikassa, mutta niitä ei ole järkevä käyttää siirtoverkoissa. Tehohäviötä, materiaalikustannuksia ja siirtoetäisyyksiä tarkastellaan kokonaisuutena, kun halutaan selvittää, miten siirtoverkko on edullisinta toteuttaa. Siirtojohdoissa vaihdejohtimet ovat yleensä alumiinia ja nollajohdin on terästä. Teräsjohdin tekee siirtojohdosta mekaanisesti vahvan.

Oppilastyössä sähkökaapelin resistanssia vastaa piiriin kytketyn vastuksen resistanssi. Työn kohdassa 1 siirtojännite on alhainen. Koska virta on suuri, tehohäviöt ($P_h = R_h I^2$) siirtojohtimen vastuksessa ovat suuret, joten lamppu ei hehku. Työn kohdassa 2 siirtojännite on korkea, jolloin siirtovirta on pieni. Vaikka siirtojohtimen resistanssi on sama kuin kohdassa 1, lamppu hehkuu. Kohdassa 2 siirtovirta on korkean jännitteen vuoksi pieni ja siksi tehohäviö on pieni.



Kodin sähköverkko ja sähköturvallisuus

Kodin sähköverkko on yhteydessä jakeluverkkoon **ryhmäkeskuksen** välityksellä. Suomessa verkkojännite on 230 V ja sähköverkko toimii taajuudella 50 Hz. Ryhmäkeskuksesta verkko jakautuu eri puolilla kotia sijaitseviin pistorasioihin, joista saadaan virtaa sähkölaitteisiin, kuten lieteen, jääkaappiin, televisioihin, tietokoneisiin ja valaisimiin. Sähköä käytetään myös lämmittämiseen esimerkiksi lämpöpatterien vastusten ja lattian sisään asennettujen kaapelien avulla.

Asuinhuoneiston ryhmäkeskuksessa on pääkytkin ja johdonsuojakatkaisijoita.

Ryhmäkeskuksessa ovat asuinhuoneiston **sulakkeet** ja **pääkytkin**. Sulakkeet suojaavat sähkön käyttäjää sähköiskulta. Ne estävät virran kulun, kun sähkölaitteeseen tulee vaarallinen vika. Ne myös suojaavat sähköjohtoa ylikuormituksen aiheuttamalta ylilämpenemiseltä silloin, kun käytössä on liian monta sähkölaitetta tai liian suuritehoinen laite. Jos sähköjohtimissa tai sähkölaitteessa tapahtuu oikosulku eli eri jännitteessä olevat johteet joutuvat kosketukseen keskenään esimerkiksi eristeen rikkoutuessa, sulake estää virran kasvamisen suureksi vikakohdassa ja laitteen vaarallisen kuumenemisen. Nykyiset sulakkeet ovat yleensä automaattisesti toimivia johdonsuojakatkaisijoita, jotka sulkevat virtapiirin, kun sallittu virta ylittyy. Kolmivaihelaitteita (esimerkiksi sähköliesi ja kiuas) varten sähkökeskuksessa on kolme sulaketta, jotka kaikki on kytkettävä pois päältä, kun laite halutaan tehdä jännitteettömäksi.

Pääkytkimestä voi kytkeä koko kodin sähköt pois esimerkiksi sähkötöitä varten. Sähkötyöt on yleensä annettava ammattilaisten tehtäväksi, mutta joitakin yksinkertaisia sähkötöitä voi tehdä itsekin, jos tietää mitä tekee ja noudattaa varovaisuutta. Turvatekniikan keskus Tukes (www.tukes.fi) antaa tietoa sähköturvallisuudesta.

Suojamaadoitettu pistorasia.

Maadoittamaton pistorasia.

Ulkopistorasia.

Uusissa rakennuksissa kaikki pistorasiat ovat yleensä **suojakosketinpistorasioita**, mutta vanhemmissa rakennuksissa on myös vanhanmallisia pistorasioita, joista suojakosketin puuttuu. Suurin osa sähkölaitteista on **suojamaadoitettuja,** eli niissä laitteen runko on yhdistetty sähköverkon kautta maahan suojakosketinpistorasiassa olevan suojajohtimen välityksellä. Jos laitteen runkoon kytkeytyy vian seurauksena jännite, jännite kytkeytyy maahan ja syntynyt vikavirta saa sulakkeen katkaisemaan virtapiirin.

Kosteissa tiloissa – kuten kylpyhuoneissa ja ulkotiloissa – olevat pistorasiat ovat suojakosketinpistorasioita, läpällisiä ja roiskevesiltä suojattuja. Koska vesi johtaa hyvin sähköä, näissä tiloissa on suuri oikosulun vaara. Ulkotiloihin asennetut joulu- ja muut koristevalot toimivat suojajännitteellä: suojajännitemuuntaja muuntaa 230 V:n verkkojännitteen 12 V:n tai 24 V:n jännitteeksi.

Monet kodinkoneet ovat *suojaeristettyjä*. Niissä laitteen ulkokuori on eristävää ainetta, kuten muovia, eikä se voi tulla jännitteelliseksi. Tällaisen laitteen pistotulppa on litteä, eikä siinä ole suojamaadoitusta. Kaikissa Suomessa myytävissä verkkovirralla toimivissa laitteissa on oltava CE-merkki.

Suurjännitteisten sähkölinjojen tai muuntajien läheisyydessä sähköpurkaus voi syntyä valokaarena johtimen ja ihmisen välille. Valokaari voi syntyä, kun on kiivetty sähköjunien, raitiovaunujen tai muuntajien päälle. Valokaaren lämpötila on jopa 3000 °C. Vain harvoin ihminen selviää hengissä tällaisesta onnettomuudesta.

Ihmiskehossa verisuonet ja kudosnesteet johtavat hyvin sähköä, luut puolestaan huonosti. Ihon sähköjohtokyky riippuu ihon kosteudesta: kostea iho johtaa paremmin kuin kuiva iho. Esimerkiksi hankaussähkön aiheuttamissa purkauksissa kehossa kulkeva sähkövirta on kymmenien mikroampeerien luokkaa. Muutaman milliampeerin virrat saavat aikaan lihaskouristuksia, ja noin kymmentä milliampeeria suuremmat virrat aiheuttavat vaaran. Suuret sähkövirrat voivat kuumentaa elimistöä sisältäpäin, ja lisäksi virran vaikutuksesta elimistöön voi muodostua myrkyllisiä aineita. Sähköiskun aiheuttamat kuolemantapaukset ovat useimmiten seuraus sähköniskun aiheuttamasta sydämen toiminnan lamaantumisesta. Sähköiskun uhria voidaan auttaa vasta, kun on varmistettu, että auttaja ei itse joudu vaaraan.

Sähkölaitteista alkaneita tulipaloja on vuosittain noin kolmasosa kaikista rakennusten tulipaloista. Tulipalo voi syttyä viallisesta sähkölaitteesta tai varomattomasta laitteen käytöstä. Tavallisimmat tulipalojen aiheuttajat ovat liesi tai uuni, vanha televisio, astian- tai pyykinpesukone, kiuas ja valaisin. Laitteiden sisään kertyvä pöly voi ennen pitkää aiheuttaa tulipalon. Siksi esimerkiksi tietokoneen ilmanottoaukot on pidettävä puhtaana. Myös television valmiusvirta kannattaa katkaista yöksi ja kotoa poistuttaessa. Sähkölaitteiden päällä ei saa säilyttää mitään esineitä – kynttilät ja kukat ovat erityisen vaarallisia.

Vaatteiden kuivattaminen sähkölämmittimien ja -kiukaiden päällä tai niiden lähellä on aiheuttanut tulipaloja. Syttymiseen johtavia syitä on useita, esimerkiksi joidenkin keinokuituisten vaatteiden alhaista syttymispistettä ei osata aina huomioida.

Sähköonnettomuuksissa ensin katkaistaan sähkövirta sähkötaulun pääkytkimestä ja pelastetaan ihmiset välittömästä vaarasta. Savu tainnuttaa nopeasti ja voi olla myrkyllistä. Palokunta hälytetään numerosta 112. Joissakin tilanteissa, palon alkuvaiheessa, palo on mahdollista sammuttaa esimerkiksi sammutuspeitteellä.

Testaa, osaatko

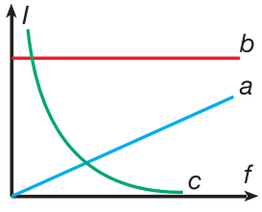
Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Suomessa sähköverkon jännite on 230 V/50 Hz. Tämä tarkoittaa, että
a) jännitteen huippuarvo on 230 V
b) sähkövirta vaihtaa suuntaansa 100 kertaa sekunnissa
c) vaihtojännitteen jaksonaika on 0,020 s.

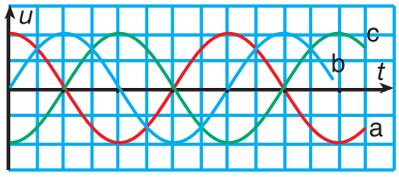
2. Vaihtovirtapiirissä on vain vastus. Silloin vastuksen päiden
a) välinen jännite on sähkövirran kanssa samassa vaiheessa
b) välinen jännite on sähkövirran kanssa vastakkaisessa vaiheessa
c) vaihe-ero on $\frac{\pi}{2}$.

3. U:n muotoisen rautasydämen toiseen haaraan on pantu käämi. Käämi on kytketty vaihtovirtapiiriin. Kun rautasydämen iestä liikutetaan poispäin, käämin induktanssi
a) suurenee b) pienenee c) pysyy samana.

4. Käämi kytkettiin vaihtojännitelähteeseen, jonka napajännite on vakio mutta taajuus muutettavissa. Missä seuraavista kuvaajista ilmenee käämin läpi kulkeva sähkövirta taajuuden funktiona?
a b c



5. Kuvaajassa esitetään *RCL*-piirin vastuksen käämin, kondensaattorin ja vastuksen jännitehäviöt ajan funktiona. Mikä kuvaajista edustaa jännitehäviötä kondensaattorissa?
a b c



6. Vaihtovirtapiiriin on kytketty käämi, jonka resistanssi on pieni. Käämin induktanssi on suuri. Käämin vaihtovirtapiiristä ottama teho on
a) suuri
b) melko suuri
c) likimain nolla.

7. Vaihtovirtapiiriin kytketyssä laitteessa jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero on 15°. Tehollinen jännite on 230 V, ja tehollinen sähkövirta on 2,4 A. Laitteen kuluttama sähköteho on
a) 550 W b) 540 W c) 530 W.

8. Muuntajan ensiöpuolen sähkövirta on 2,5 A ja kierrosluku 200. Toisiopuolen kierrosluku on 100. Toisiopuolen sähkövirta on
a) 1,3 A b) 5,0 A c) 15 A.

9. Tehohäviöiden pienentämisen vuoksi sähkönsiirtojohdoissa käytetään
a) ohuita johtimia
b) alumiinia
c) suuria jännitteitä.

10. Kolmivaihegeneraattorissa
a) vaihejohtimen ja maan välinen jännite on 230 V
b) kahden vaihejohdon välinen jännite on 400 V
c) jännitteiden vaihe-erot ovat 120°.

Tiivistelmä

- Vaihtovirtageneraattorin avulla voidaan synnyttää vaihtojännitettä. Hetkellinen lähdejännite on $e = e_0 \sin \omega t$, napajännite $u = u_0 \sin \omega t$ ja sähkövirta $i = i_0 \sin \omega t$.
  Napajännitteen tehollinen arvo on $U = \frac{u_0}{\sqrt{2}}$ ja sähkövirran $I = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$.

RCL-piirin komponenttien ominaisuuksia			
	Vastus	Käämi	Kondensaattori
Jännite	$u = u_0 \sin(2\pi ft)$	$u = u_0 \sin(2\pi ft + \varphi)$	$u = u_0 \sin(2\pi ft - \varphi)$
Jännitteen vaihe	samassa vaiheessa kuin sähkövirta	edellä sähkövirtaan nähden	jäljessä sähkövirtaan nähden
Vaihe-ero φ	0	$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$
Sähkövirta	$i = i_0 \sin(2\pi ft)$	$i = i_0 \sin(2\pi ft)$	$i = i_0 \sin(2\pi ft)$
Kyky vastustaa vaihtovirtaa	R	X_L	X_C
Taajuusriippuvuus	R ei riipu taajuudesta	$X_L \sim f$	$X_C \sim 1/f$
Sähkövirran tehollinen arvo	$I = \frac{U}{R}$	$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi fL}$	$I = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{\frac{1}{2\pi fC}}$

- *RCL*-piirin impedanssi on $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, jossa piirin induktiivinen reaktanssi on $X_L = \omega L = 2\pi fL$ ja kapasitiivinen reaktanssi $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$.

  Suuretta $X = X_L - X_C$ kutsutaan reaktanssiksi.

- Laite, jolla on resistanssin lisäksi reaktanssia, kuluttaa energiaa vaihtovirtapiirissä teholla $P = UI\cos\varphi$; $\cos\varphi$ on tehokerroin ja φ sähkövirran ja jännitehäviön vaihe-ero.

- Energiansiirrossa johtimet lämpenevät Joulen lain $P = RI^2$ mukaisesti.

- Ideaaliselle muuntajalle on voimassa yhtälö $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$.

4 Sähkömagneettinen värähtelypiiri

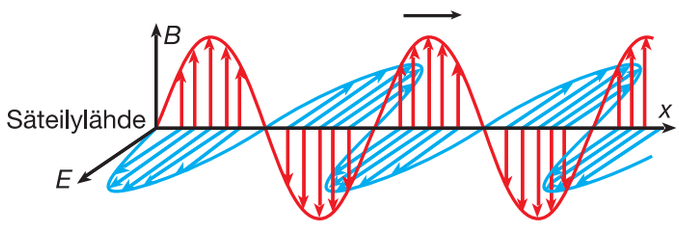
Tässä luvussa opit
- sarjaresonanssin
- suljetun ja avoimen värähtelypiirin
- antennin
- sähkömagneettisen tiedonsiirron.

Keskeisiä käsitteitä ovat
- ominaistaajuus
- resonanssitaajuus.

Sähkömagneettinen kenttä kuljettaa energiaa ja tietoa

Englantilainen *Michael Faraday* osoitti 1830-luvulla, että sähköisillä ja magneettisilla ilmiöillä on yhteys toisiinsa. Tämä on yksi fysiikan historian merkittävimmistä keksinnöistä. Skotlantilainen *James Clerk Maxwell* esitti 1860-luvulla matemaattisen todistuksen Faradayn havainnolle. **Maxwellin yhtälöiden** mukaan muuttuva sähkökenttä saa aikaan magneettikentän ja muuttuva magneettikenttä saa aikaan sähkökentän.

Maxwellin yhtälöt selittivät kaikki tunnetut sähköiset ja magneettiset ilmiöt, mutta lisäksi ne paljastivat täysin uuden ilmiön, **sähkömagneettisen aallon**. Yhtälöiden mukaan sähkö- ja magneettikenttien muutokset synnyttävät avaruudessa etenevän häiriön eli aallon. Sähkömagneettinen aalto ei tarvitse väliainetta – toisin kuin esimerkiksi ääniaalto –, vaan se etenee myös tyhjässä avaruudessa. Sähkömagneettinen aalto etenee tyhjiössä aina samalla nopeudella, valonnopeudella *c*. Aallon mukana siirtyy energiaa, mihin perustuu sähkömagneettisen säteilyn käyttö esimerkiksi radio- ja televisiolähetyksissä sekä matkapuhelimissa.



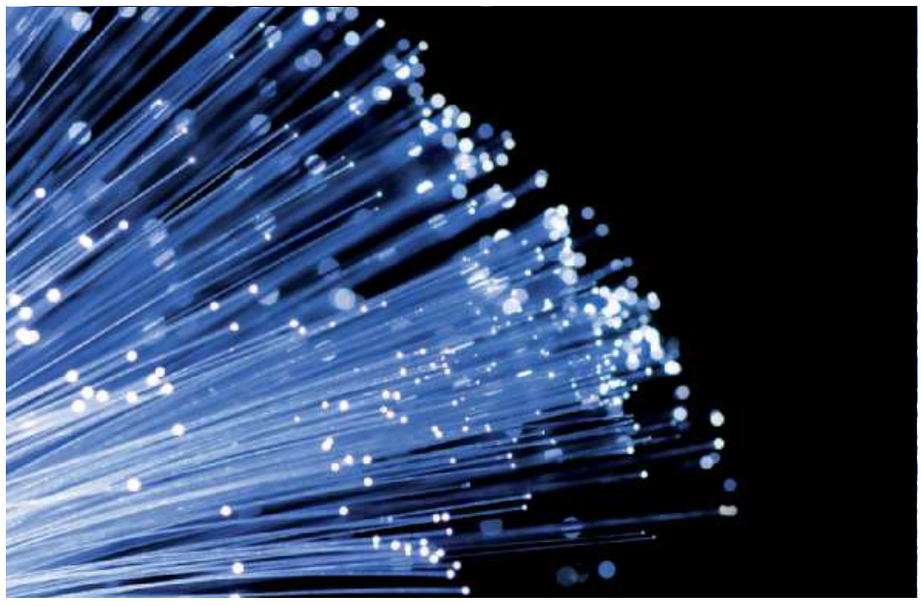
Sähkömagneettisen aallon sähkö- ja magneettikentät *x*-akselin eri pisteissä jollakin hetkellä. Kun aika kuluu, aalto etenee oikealle muotonsa säilyttäen.

Avaruudessa etenevä jatkuva sähkömagneettinen aalto ilmenee sähkökentän ja magneettikentän suuruuksien ja suuntien säännönmukaisena vaihteluna jokaisessa avaruuden pisteessä. Kentät ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan, ja aalto etenee suuntaan, joka on kohtisuorassa niitä molempia vastaan. Sähkömagneettisen aallon synnyttämiseen tarvitaan muuttuva sähkö- tai magneettikenttä ja jokin energialähde. Aalto syntyy perimmältään sähkövarauksien värähtelyistä. Synnyttyään se etenee avaruudessa pitäen itse itseään yllä.

Sähkömagneettisen aallon nopeus
Sähkömagneettinen aalto etenee valonnopeudella c. Jos aallon aallonpituus on λ, sähkökenttä ja magneettikenttä, joista aalto muodostuu, värähtelevät taajuudella $f = c/\lambda$.

Saksalainen *Heinrich Hertz* todisti sähkömagneettisten aaltojen olemassaolon vuonna 1888. Hän synnytti ja vastaanotti radioaaltoja rakentamillaan yksinkertaisilla laitteilla. Sähkömagneettisia aaltoja voi synnyttää esimerkiksi *RCL*-piirin avulla. Piirin kondensaattori synnyttää vaihtuvan sähkökentän ja käämi vaihtuvan magneettikentän, jotka molemmat synnyttävät sähkömagneettisen aallon. Piiri voi toimia myös säteilyn vastaanottimena.

Langaton viestintä – kuten radio, kännykkä ja langattomat verkkoyhteydet – perustuu sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen ja vastaanottamiseen elektronisten värähtelypiirien avulla.



Valoa, joka sekin on sähkömagneettista aaltoliikettä, käytetään valokuitujen avulla tapahtuvassa optisessa tiedonsiirrossa.

4.1 Resonanssi

Mihin perustuu radion kanavan valitseminen?

Resonanssitaajuus

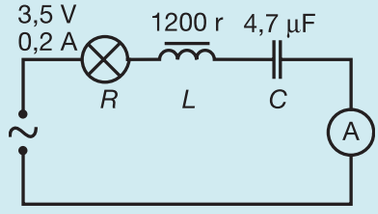
Oppilastyö ▪ Vastus, käämi ja kondensaattori vaihtovirtapiirissä

Rakenna kuvan mukainen vaihtovirtapiiri. Käytä säädettävää vaihtojännitelähdettä, jonka taajuus on 50 Hz. Säädä jännitteeksi noin 20 V.

1. Kytke kondensaattori ja vastuksena toimiva lamppu sarjaan ja mittaa sähkövirta.

2. Kytke sama lamppu sarjaan U:n muotoisen rautasydämellä varustetun käämin kanssa ja mittaa sähkövirta. Aseta käämin rautasydämen päälle ies ja tarkkaile sähkövirtaa.

3. Kytke kaikki komponentit sarjaan. Varusta käämin rautasydän ikeellä kuvan mukaisesti. Mittaa piirissä kulkeva sähkövirta. Siirrä iestä hitaasti pois U-sydämen päältä ja tarkkaile sähkövirtaa siirtämisen aikana.



Oppilastyön kohdassa 1 ampeerimittari osoittaa, että piirissä kulkee noin 30 mA:n sähkövirta, mutta lamppu ei hehku näin pienellä virralla. Kohdassa 2 sama lamppu kytketään sarjaan U:n muotoisen rautasydämellä varustetun käämin kanssa. Tällöin lamppu hehkuu ja sähkövirta on noin 0,20 A.

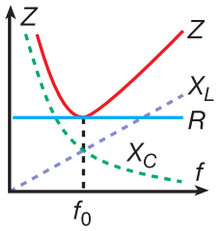
Kun iestä siirretään rautasydämen päälle, sähkövirta pienenee voimakkaasti, koska käämin induktanssi (L) kasvaa ja samalla kasvavat myös käämin induktiivinen reaktanssi ($X_L = 2\pi fL$) ja piirin impedanssi. Lopulta lamppu sammuu.

Oppilastyössä lamppu ei hehku, kun ies on U-sydämen päällä. Piirissä kulkeva sähkövirta on silloin vain 15 mA. Kun iestä siirretään hitaasti poispäin, havaitaan, että ensin sähkövirta kasvaa maksimiarvoon (noin 0,15 A) asti. Tällöin lamppu hehkuu kirkkaasti. Kun iestä siirretään edelleen, sähkövirta pienenee.

Vaihtovirtapiirissä virran tehollinen arvo on

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

Virran suurin arvo saavutetaan, kun virtapiirin impedanssi saa pienimmän arvonsa eli kun käämin induktanssia säätämällä reaktanssi $X = X_L - X_C$ saavuttaa arvon nolla. Vaihtovirtapiirin sanotaan silloin olevan **sarjaresonanssitilassa**. Jos reaktanssin X arvon poikkeama nollasta kasvaa kumpaan suuntaan tahansa, reaktanssin neliö X^2 kasvaa ja samalla piirin impedanssi kasvaa, sähkövirta pienenee ja lamppu himmenee. Oppilastyössä sarjaresonanssitila saavutettiin (lamppu hehkui kirkkaana) ja ohitettiin, kun käämin induktanssia L muutettiin iestä siirtämällä.



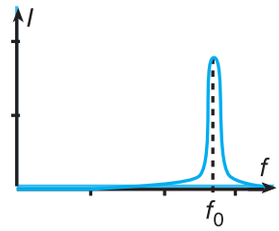
***RCL*-piirin impedanssi taajuuden funktiona. Impedanssi on pienimmillään resonanssitaajuuden f_0 kohdalla.**

Kun *RCL*-piiri on sarjaresonanssitilassa, sen impedanssi $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ saa pienimmän arvonsa eli silloin $X_L - X_C = 2\pi f_0 L - \frac{1}{2\pi f_0 C} = 0$. Resonanssissa olevan *RCL*-piirin taajuus on siten $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Taajuus f_0 on piirin **resonanssitaajuus**.

Resonanssitaajuus
RCL-piirin resonanssitaajuus on

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

jossa L on piirin induktanssi ja C piirin kapasitanssi. Sarjaresonanssitilassa piirissä kulkeva sähkövirta on suurimmillaan.

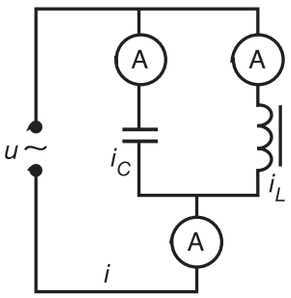


***RCL*-piirin sähkövirta on suurin silloin, kun piiri toimii resonanssitaajuudella f_0.**

Sähkövirta ”piikittyy” resonassitaajuuden f_0 kohdalle. Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin arvot vaikuttavat virtapiikin leveyteen. Jos piikki on terävä, pienikin poikkeama resonanssitaajuudesta saa piirissä kulkevan sähkövirran pienenemään voimakkaasti. Tällaista piiriä voidaan käyttää taajuuksien suodattamiseen. Jos piiri kytketään jännitelähteeseen, joka syöttää piiriin samanaikaisesti useita eri taajuuksia, piirin sähkövirta määräytyy lähes pelkästään sen osan mukaan, jonka taajuus on sama kuin piirin resonanssitaajuus.

Kun käännät radiovastaanottimen kanavavalitsinta, muutat kanavavalitsinpiirin eli viritinpiirin kondensaattorin kapasitanssia. Tämä muuttaa viritinpiirin resonanssitaajuutta. Kun resonanssitaajuus on sama kuin etsimäsi radiokanavan taajuus, radiovastaanottimeen välittyy pelkästään sen kanavan ohjelma.

Sähkömagneettinen värähtelypiiri



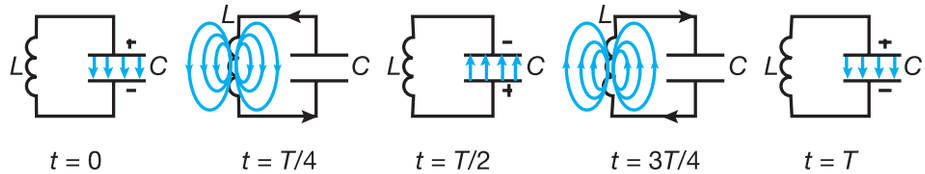
Oppilastyö ▪ Sähkömagneettinen värähtelypiiri
Kytke kondensaattori ja käämi rinnan kuvan mukaisesti. Käytä erilaisia kondensaattoreita ja taajuusgeneraattoria virtalähteenä. Etsi piirin resonanssitila taajuutta ja käämin induktanssia muuttamalla.

f/Hz	*C*/μF	*N*/r, rautasydän	I_L/mA	I_C/mA	*I*/mA
50	47	1200	84	140	45
1300	30	600	32	59	22
1100	24	600	29	40	13

Oppilastyön kolmessa mittauksessa saatiin taulukossa esitetyt tulokset. Taulukon ylimmän rivin mittauksessa on käytetty 50 Hz:n vaihtovirtalähdettä, muissa taajuusgeneraattoria. Tehollisen kokonaisvirran I pienin arvo on saatu muuttamalla käämin induktanssia rautasydämen avulla. Oppilastyössä huomattiin, että kokonaisvirta I on selvästi pienempi kuin kondensaattorin ja käämin läpi kulkevien virtojen summa. Vaihtovirta kulkee siis pääosin käämin ja kondensaattorin muodostamassa värähtelypiirissä.

Kondensaattorin ja käämin muodostamaa virtapiiriä kutsutaan **sähkömagneettiseksi värähtelypiiriksi**. Kun sähkömagneettisessa värähtelypiirissä kondensaattori ladataan ja virtapiiri suljetaan, kondensaattori alkaa purkautua ja virtapiiriin syntyy sähkövirta. Käämin itseinduktanssi vastustaa virran kasvua Lenzin lain mukaisesti. Kun kondensaattorin varaus on purkautunut loppuun, käämin itseinduktanssi pyrkii pitämään virtaa yllä. Tämän seurauksena kondensaattori alkaa latautua uudelleen mutta alkuperäiseen lataukseen verrattuna vastakkaismerkkisesti. Kun kondensaattori on latautunut täyteen, se alkaa jälleen purkautua ja sähkövirran suunta piirissä vaihtuu. Värähtely jatkuu sinimuotoisena vaihtovirtana, jonka taajuus on resonanssitaajuus $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Resonanssitaajuutta f_0 kutsutaan sähkömagneettisen värähtelypiirin **ominaistaajuudeksi**. Ominaistaajuudella värähtelevän värähtelypiirin impedanssin $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ määrää resistanssi R, koska tällöin piirin reaktanssi on nolla eli $X_L - X_C = 0$. Jos resistanssi on pieni, pienikin ulkoinen jännite saa piirissä kulkemaan suuren sähkövirran.



Kondensaattorin ja käämin muodostamaa virtapiiriä kutsutaan **suljetuksi värähtelypiiriksi**. Kun kondensaattori ladataan esimerkiksi pariston avulla, piiriin tuodaan energiaa. Piirin energia on silloin kokonaan kondensaattorin sähkökentän energiaa

$E = E_{C,\max} = \frac{1}{2} C U_{\max}^2$. Kun piiri suljetaan ja kondensaattori alkaa purkautua (hetki $t = 0$), piirissä kulkeva sähkövirta synnyttää käämiin magneettikentän. Magneettikenttä kasvaa sähkövirran kasvaessa. Se saavuttaa suurimman arvonsa, kun kondensaattori on kokonaan purkautunut $\left(t = \frac{1}{4} T\right)$. Sähkökentän energia on muuntunut silloin kokonaan magneettikentän energiaksi, $E = E_{L,\max} = \frac{1}{2} L I_{\max}^2$.

Kondensaattori alkaa varautua uudelleen. Kun sen varaus on suurimmillaan, piirin sähkövirta on nolla eikä käämillä ole magneettikenttää ($t = T/2$). Piirin energia on silloin siirtynyt käämin magneettikentästä takaisin kondensaattorin sähkökenttään. Sama toistuu, kun sähkövirran suunta piirissä vaihtuu. Sähkökentän energia muuntuu ensin magneettikentän energiaksi $\left(t = \frac{3}{4} T\right)$ ja takaisin sähkökentän energiaksi ($t = T$). Värähdysajan T kuluttua piiri on palautunut alkuperäiseen tilaansa eli se on käynyt läpi yhden värähtelyjakson.

Sähkömagneettisen värähtelypiirin värähtely vaimenee, koska energiaa muuntuu resistanssin takia johtimien sisäenergiaksi ja johtimet lämpenevät. Joka värähtelykerralla kenttiin varastoituu vähemmän ja vähemmän energiaa ja piirissä kulkeva sähkövirta pienenee. Värähtelijä menettää energiaa myös sähkömagneettisena säteilynä. Koska sekä kondensaattorin sähkökentän että käämin magneettikentän suuruus ja suunta vaihtelevat, värähtelypiiri synnyttää Maxwellin teorian mukaisesti sähkömagneettista säteilyä. Säteilyn mukana energiaa siirtyy ympäröivään avaruuteen.

Sähkömagneettista värähtelijää voi verrata mekaaniseen värähtelijään, esimerkiksi jousen päässä heilahtelevaan punnukseen. Punnuksen energia on välillä kokonaan liike-energiaa, välillä kokonaan jousen potentiaalienergiaa (ks. Fysiikka 4, sivu 129). Potentiaali- ja liike-energia vastaavat värähtelypiirin sähkökenttää ja magneettikenttää. Ilmanvastus ja muut vastusvoimat vastaavat värähtelypiirin resistanssia. Ne vaimentavat värähtelyä eli saavat värähtelyn amplitudin pienenemään samaan tapaan kuin resistanssi pienentää värähtelypiirissä kulkevan sähkövirran amplitudia. (Sähkömagneettisten aaltojen vastine ovat gravitaatioaallot, joita edestakaisin liikkuva kappale synnyttää, mutta niiden merkitys on mekaaniselle värähtelijälle häviävän pieni.)

Esimerkki 1

Sähkömagneettisen värähtelypiirin käämin induktanssi on 0,10 μH ja piirin resonanssitaajuus 97,7 MHz.
a) Laske värähtelypiirin säätökondensaattorin kapasitanssi.
b) Värähtelypiiriin indusoitunut jännite on 0,10 mV, ja piirin resistanssi on 110 Ω. Kuinka suuri on sähkövirran maksimiarvo?

$U = 0{,}10\ \text{mV}, \quad R = 110\ \Omega, \quad f_0 = 97{,}7\ \text{MHz}, \quad L = 0{,}10\ \mu\text{H}$

a) Värähtelypiirin resonanssitaajuus on $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Korotetaan yhtälö puolittain neliöön: $f_0^2 = \dfrac{1}{4\pi^2 LC}$.

Tästä ratkaistuna kapasitanssi on

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (97{,}7 \cdot 10^6\ \text{Hz})^2 \cdot 0{,}10 \cdot 10^{-6}\ \text{H}}$$
$$\approx 27\ \text{pF}.$$

Säätökondensaattorin kapasitanssi on 27 pF.

b) Resonanssitaajuudella värähtelevän piirin impedanssi aiheutuu pelkästään resistanssista R, joten impedanssi on $Z = R = 110\ \Omega$. Tehollinen sähkövirta saa maksimiarvonsa resonanssitaajuudella. Sähkövirta on

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{0{,}10 \cdot 10^{-3}\ \text{V}}{110\ \Omega} \approx 0{,}91\ \mu\text{A}.$$

Sähkövirran maksimiarvo on 0,91 μA.

Esimerkki 2

Suljetussa värähtelypiirissä on käämi ja kondensaattori. Piirin kondensaattorin suurin jännite on 3,8 V ja kapasitanssi 32 nF. Piirin maksimivirraksi mitataan 560 mA. Määritä käämin induktanssi.

$U_{max} = 3{,}8\ \text{V}, \quad C = 32\ \text{nF}, \quad I_{max} = 560\ \text{mA}$

Suljetussa värähtelypiirissä kondensaattorin sähkökentän energia muuntuu käämin magneettikentän energiaksi. Kun piirin energian muuttumista komponenttien sisäenergiaksi ja säteilyksi ei oteta huomioon, energian säilymislain mukaan kondensaattorin ja käämin maksimienergiat ovat yhtä suuret. Saadaan yhtälö

$$E_{C,max} = E_{L,max} \quad \text{eli} \quad \frac{1}{2}CU_{max}^2 = \frac{1}{2}LI_{max}^2.$$

Ratkaistaan yhtälöstä käämin induktanssi:

$$L = \frac{U_{max}^2}{I_{max}^2}C = \frac{(3{,}8\ \text{V})^2}{(0{,}56\ \text{A})^2} \cdot 32 \cdot 10^{-9}\ \text{F} \approx 1{,}5\ \mu\text{H}.$$

Käämin induktanssi on 1,5 μH.

Tehtäviä

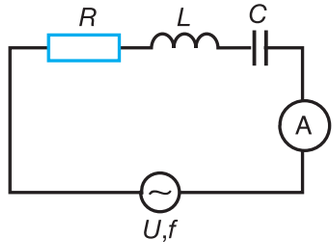
4-1. Sähkömagneettisen värähtelypiirin induktanssi on 10,0 mH ja kapasitanssi 2,0 nF. Laske piirin ominaistaajuus.

4-2. Radion antennipiirin induktanssi on 15 mH. Radiolla halutaan kuunnella kanavaa, jonka taajuus on 97,7 MHz. Kuinka suuri tulee säätökondensaattorin kapasitanssin olla?

4-3. Kun tutkittiin kuvan kytkentäkaavion mukaista virtapiiriä, jännitelähteenä olleen signaaligeneraattorin tehollisjännite oli koko ajan 3,8 V. Kun jännitteen taajuutta muutettiin, sähkövirta muuttui oheisen taulukon mukaisesti:

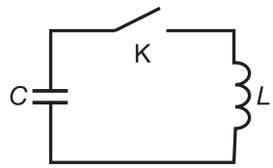
f/Hz	I/mA	f/Hz	I/mA
50	0,21	400	8,62
100	1,00	450	5,61
150	1,66	500	4,12
200	2,67	550	3,28
250	4,41	600	2,74
300	8,11	650	2,36
320	10,4	700	2,09
340	12,3	750	1,87
375	11,0	800	1,70

a) Esitä graafisesti sähkövirran riippuvuus taajuudesta.
b) Määritä kuvaajasta piirin resonanssitaajuus.
c) Laske piirin resistanssi ja käämin induktanssi, kun kondensaattorin kapasitanssi on 0,32 μF. [S2003, 15]



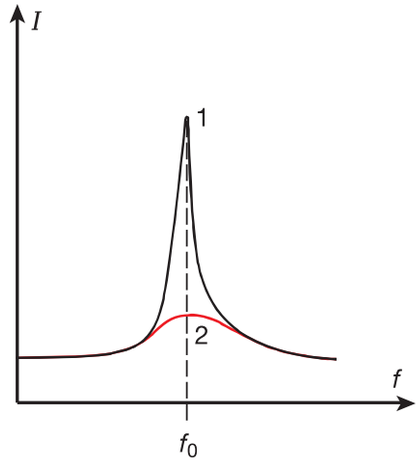
4-4. Vaimenemattomassa värähtelypiirissä kondensaattorin kapasitanssi on 2,6 μF ja käämin induktanssi 0,12 H. Kondensaattori varataan 12,4 V:n jännitteeseen, minkä jälkeen yhteys jännitelähteeseen katkaistaan. Laske käämissä kulkevan virran huippuarvo.

4-5. Kondensaattori, jonka kapasitanssi on 0,45 μF, ja käämi, jonka induktanssi on 120 mH ja resistanssi hyvin pieni, on kytketty oheisen kaavion mukaisesti. Kondensaattori on ladattu 110 V:n jännitteeseen. Kytkin K suljetaan. Laske käämin läpi kulkevan virran suurin arvo ja esitä graafisesti virta ajan funktiona.

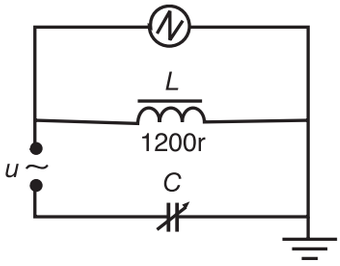


4-6. Radio Kettu lähettää ohjelmaa taajuudella 84,1 MHz. Radiovastaanottimessasi on resonanssipiiri, jossa on kytkettynä sarjaan vastus ($R = 5{,}00\ \Omega$), käämi ($L = 1{,}50\ \mu\text{H}$) ja säätökondensaattori. Radion antenni toimii piirin jännitelähteenä.
a) Mihin kapasitanssin arvoon säätökondensaattori on asetettava, jotta piiri olisi resonanssissa Radio Ketun taajuuden kanssa? Mikä on tällöin piirin impedanssi?
b) Merirosvoradio Shark lähettää omaa ohjelmaansa taajuudella 84,2 MHz. Jos piiri on säädetty resonanssiin Radio Ketun kanssa, mikä on Radio Sharkin lähetystaajuutta vastaava impedanssi?

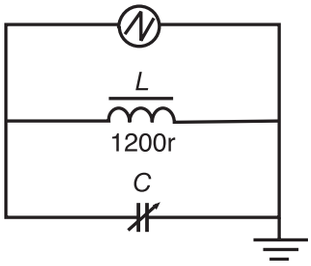
4-7. Kuvassa on esitetty kahden samassa jännitteessä olevan sähkömagneettisen värähtelypiirin sähkövirta taajuuden funktiona. Mitkä seuraavista väitteistä voivat pitää paikkansa?
a) Piireillä 1 ja 2 on sama resistanssi ($R_1 = R_2$), mutta toisistaan poikkeavat induktanssit ($L_1 \neq L_2$) ja kapasitanssit ($C_1 \neq C_2$).
b) Piirin 2 resistanssi R_2 on suurempi kuin piirin 1 resistanssi R_1.
c) Pätee $\dfrac{L_1}{L_2} = \dfrac{C_2}{C_1}$.



4.2 Antenni



Lähetinantenni.



Vastaanotinantenni.

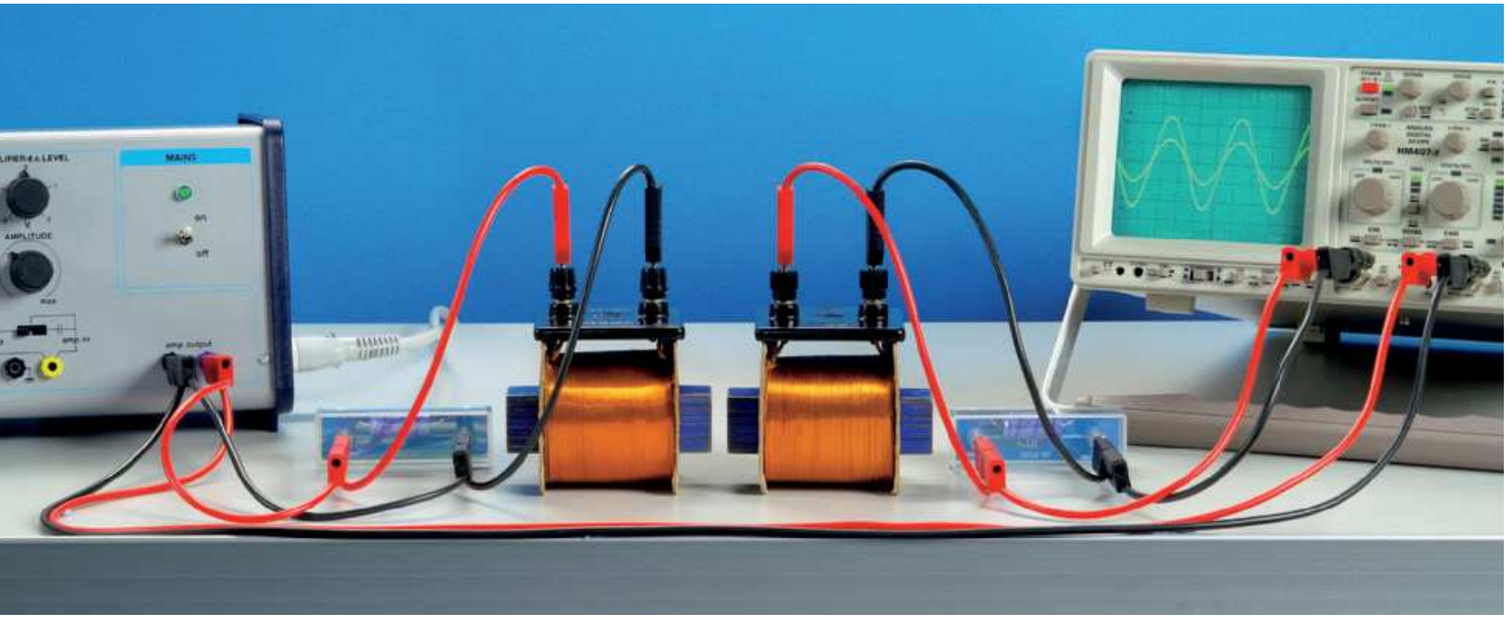
Avoin värähtelypiiri

Sähköisillä värähtelypiireillä tuotetaan sähkömagneettisia aaltoja, joiden avulla voidaan siirtää tietoa, ääntä ja kuvaa. Aaltojen lähettämiseen ja vastaanottamiseen tarvitaan antenni. Yksinkertaisimmillaan antennin voi muodostaa suora johdin. Kännyköiden handsfree-kuulokkeissa on yksinkertainen vastaanottava antenni, langattomissa mikrofoneissa sähkömagneettisia aaltoja lähettävä antenni. Suurimpia antenneja ovat satelliittien avulla tapahtuvaan viestintään ja avaruuden radioaaltojen vastaanottamiseen tarkoitetut lautasantennit.

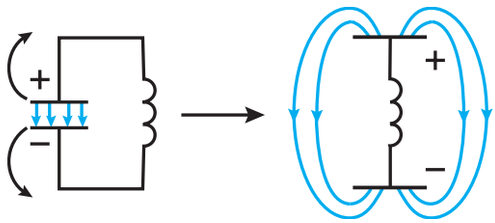
Oppilastyö ▪ Värähtelypiiri lähettimenä ja vastaanottimena

Rakenna kaksi samanlaista värähtelypiiriä. Liitä piirit oskilloskoopin eri kanaviin. Etsi sopiva taajuus lähetinpiirin värähtelyn synnyttämiseksi. Käytä säädettävää kondensaattoria lähettimen signaalin löytämiseksi. Muuta lähettimen ja antennin keskinäistä asemaa, kunnes saat antennipiiriin mahdollisimman voimakkaan signaalin. Vertaile signaaleja oskilloskoopin näytöltä.

Oppilastyössä (valokuvan) vasemmanpuoleinen värähtelypiiri lähettää ja oikeanpuoleinen värähtelypiiri vastaanottaa sähkömagneettisia aaltoja ominaistaajuudellaan. Vastaanottopuolella

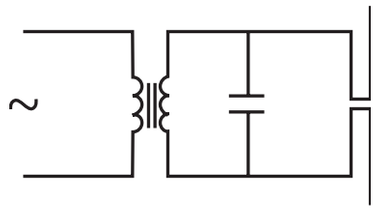


aaltoliike on vaimentunut; tämä ilmenee oskilloskoopin kuvaputkella olevien kuvaajien amplitudeista. Vastaanotinpiirin signaalin voimakkuus oli sitä heikompi, mitä kauempana antenni oli. Myös piirien asennon muuttaminen toistensa suhteen muutti antennipiirin signaalin voimakkuutta. Havaittiin, että lähetinpiiri lähettää säteilyä eri voimakkuudella eri suuntiin ja että vastaanotinpiirin herkkyys ottaa vastaan säteilyä riippuu niin ikään suunnasta.



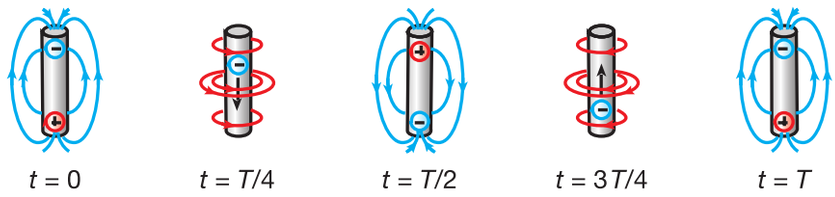
Kun suljetun virtapiirin kondensaattorilevyt kierretään erilleen, syntyy avoin virtapiiri.

Oppilastyön värähtelypiiri lähettää säteilyä tehokkaammin, jos värähtelypiiriin liitetään johdin tai värähtelypiirin kondensaattorin levyt kierretään erilleen. Tällaista antennia kutsutaan **dipoliantenniksi** ja värähtelypiiriä **avoimeksi värähtelypiiriksi**. Avoimeen värähtelypiiriin voidaan tuoda energiaa, kun värähtelypiirin käämi kytketään induktiivisesti energiaa tuottavaan käämiin. Värähtelypiiriin syötetty energia poistuu antennin kautta sähkömagneettisena aaltona. Sähkö- ja magneettikenttä antennin ympärillä muuttuvat jaksollisesti.



Värähtelypiiri indusoi dipoliantenniin värähtelyn.

Kun suljettu värähtelypiiri värähtelee lähetinantennina toimivan dipoliantennin vieressä, antennin elektronit värähtelevät samalla taajuudella, jolla suljettu värähtelypiiri värähtelee. Suljettu värähtelypiiri syöttää lähetinantenniin energiaa induktiivisen kytkennän kautta. Antennin ympärillä vuorottelevat sähkö- ja magneettikenttä. Nämä muuttuvat kentät lähettävät ympäristöön **sähkömagneettisen** aallon, joka etenee valonnopeudella.



Kuvasarja esittää antennin vapaiden elektronien värähtelyä piirrettynä $\frac{T}{4}$:n aikavälein. T on värähdysaika.

Sähkömagneettinen aalto syntyy antennissa elektronien edestakaisen liikkeen seurauksena. Dipoliantennin muodostama sähkökenttä värähtelee antennin suuntaisesti, koska elektronien liike on sen suuntainen. Sähkökentän värähtelysuunta on myös antennin lähettämän säteilyn polarisaatiosuunta eli sen sähkökentän värähtelysuunta. Tällainen värähtelypiiri on tehokas sähkömagneettisen säteilyn lähde. Jos vastaanottoantenni on dipoliantenni, se vastaanottaa sitä voimakkaamman signaalin, mitä tarkemmin se

on asetettu lähettimen polarisaatiosuunnan kanssa yhdensuuntaiseksi. Vastaanottoantenni ei vastaanota lainkaan signaalia, jos se on kohtisuorassa lähettimen polarisaatiosuuntaa vastaan.

Antennista lähtevät aallot ovat poikittaista aaltoliikettä. Lähetinantennin pituus määrää lähetettävän aallon aallonpituuden. Aallonpituus on $\lambda = 2l$.

Antennin lähettämän aallon aallonpituus
Värähtelypiirin antennin lähettämän sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on

$$\lambda = 2l,$$

jossa l on lähetinantennin pituus.

Yleisin vastaanottimen dipoliantennin muoto on ns. puoliaaltodipoli, jossa antennin pituus on puolet vastaanotettavan aallon pituudesta. Käytännössä dipoliantennit ottavat vastaan signaaleja tietyllä aallonpituusvälillä. Vastaanottimen viritinpiirin avulla saadaan vastaanotinantennin toimintavälille osuvista lähetystaajuuksista valittua haluttu taajuus. Asemavalitsimesta säädetään viritinpiirin kondensaattorin kapasitanssia, kunnes viritinpiirin ominaistaajuus f_0 on sama kuin halutun ohjelman lähetystaajuus. Radiossa voi olla useita viritinpiirejä sekä erilaisia suodattimia, jotka suodattavat pois häiritseviä aallonpituuksia.

Matkapuhelimessa tarvitaan useilla eri aallonpituuksilla toimivia antenneja, jotta sitä voi käyttää eri puhelinverkoissa ja tietoliikenneverkoissa. Useimmiten antennit ovat ns. PIFA-antenneja (*Planar Inverted F Antenna*). Ne muodostuvat useasta johdinlevystä, joilla kullakin on oma induktanssinsa ja kapasitanssinsa ja jotka toimivat värähtelypiireinä eri taajuusalueilla.

Koska lähettimen lähettämä aalto leviää moniin suuntiin, sen intensiteetti (aallon mukana pinta-alayksikköä kohti tuleva energia aikayksikössä) pienenee etäisyyden kasvaessa. Vastaanottimeen tulevan säteilyn intensiteetti on vain murto-osa lähetinantennin lähettämän säteilyn intensiteetistä. Tämän takia signaali pitää vahvistaa vastaanottimessa, jotta lähetys on kuultavissa tai katsottavissa.

Pohdi ja etsi

4-8. a) Mitä tarkoitetaan antennin suuntakuviolla?
b) Mitä tarkoitetaan antennin kaistanleveydellä?

4-9. Kuvassa on Very Large Array (VLA) radioobservatorio New Mexicossa, Yhdysvalloissa. Miksi radiotähtitieteessä käytetään lautasantenneja?

4-10. Selvitä suunta-antennin eli Yagi-antennin rakenne ja toimintaperiaate.

4-11. a) Ionosfääri mahdollistaa radioaaltojen etenemisen jopa maapallon ympäri. Miten radioaallot tällöin etenevät?
b) Miksi juuri ionosfääri on radioyhteyksien kannalta tärkeä?

Tehtäviä

4-12. Dipoliantennin pituus on 1,00 m.
a) Mikä on sen lähettämien radioaaltojen taajuus?
b) Missä ajassa radioaallot etenevät Suomen pituisen matkan, noin 1000 km?

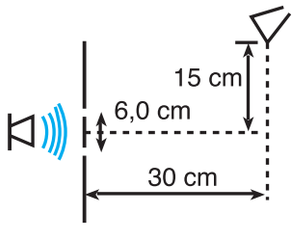
4-13. a) Matkapuhelimien datan siirtoon käytettävän UMTS-verkon (*Universal Mobile Telecommunications System*) taajuudet ovat Suomessa 900 MHz ja 2100 MHz. Laske tarvittavien vastaanottoantennien pituudet.
b) Onko samalla puhelimella mahdollista käyttää molempia verkkoja?

4-14. Antennivärähtelypiirin käämin induktanssi on 0,80 mH, ja säätökondensaattorin kapasitanssia voidaan vaihdella 2,0 pF:n ja 50 pF:n välillä. Mitä aallonpituuksia tämä piiri voi ottaa vastaan?

4-15. Radion uutistenlukija aloittaa lähetyksen. Retkeilijä kuuntelee lähetystä korvalappuradiosta 150 km:n etäisyydellä radioasemasta. Radiostudiossa avustava toimittaja istuu 4,5 m:n päässä uutistenlukijasta. Hän kuulee lähetyksen ääniaaltojen välityksellä. Kumpi kuulee uutiset ensin, retkeilijä vai avustaja?

4-16. a) Tutka on laite, joka vastaanottaa lähettämänsä sähkömagneettisen säteilyn heijastumia. Missä eri tarkoituksissa tutkaa voidaan käyttää?
b) Poliisi valvoo liikennettä tutkalla, jonka lähettämän radioaallon taajuus on 11 GHz. Autosta heijastuu tutkaan aalto, jonka taajuus on suurentunut 1,2 kHz:llä. Millä nopeudella auto lähestyy tutkaa?

4-17. Mikroaaltolähettimen hyvin lyhyet radioaallot osuvat kahteen metallilevyssä olevaan rakoon, joiden välinen etäisyys on 6,0 cm. Kaksoisraon takana 30,0 cm:n etäisyydellä kuljetetaan mikroaaltovastaanotinta metallilevyn suuntaisesti, oheisen kuvan mukaisesti. Kun vastaanotin on 15 cm:n päässä keskikohdasta, havaitaan toisen kertaluvun radioaaltojen vahvistus. Mikä on mikroaaltolähettimen radioaaltojen a) aallonpituus b) taajuus?



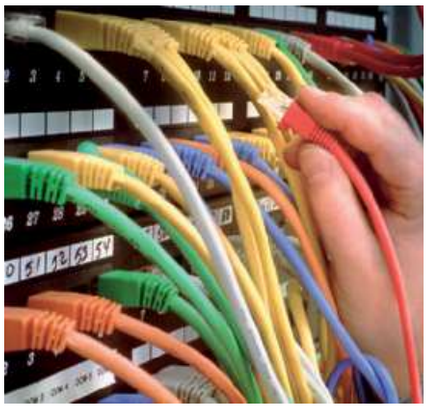
Lennättimessä signaali saadaan aikaan synnyttämällä virtapiiriin sähkötysavaimen avulla lyhyitä ja pitkiä virtapulsseja. Kullakin kirjaimella ja numerolla on oma pulssiyhdistelmänsä, ja nämä yhdistelmät muodostavat ns. Morsen aakkoset.

Majakat ovat vanhimpia sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvia viestintälaitteita.

4.3 Sähkömagneettinen tiedonsiirto

Sähkömagneettisen säteilyn tärkein sovellus on tiedonsiirto. Tietoa voidaan siirtää johtimia pitkin tai langattomasti. Langallisessa tiedonsiirrossa käytetään jännitesignaaleja tai valokuidussa etenevää valoa; langaton tiedonsiirto perustuu yleensä radiosignaaleihin tai infrapunavaloon.

Langallinen tiedonsiirto alkoi lennättimen keksimisestä Euroopassa 1800-luvun alkupuolella. Lennättimen käytännöllisen version kehitti yhdysvaltalainen *Samuel Morse* vuonna 1835. *Alexander Bell* keksi puhelimen toimintaperiaatteen Yhdysvalloissa vuonna 1876. Puhelimessa mekaaninen ääniaalto muunnetaan sähköiseksi signaaliksi sähkömagneettisen induktion avulla ja vastaanottopäässä samalla menetelmällä takaisin ääniaalloiksi. Valokuitujen käyttö tiedonsiirrossa alkoi yleistyä 1980-luvulla. Valokuiduissa tieto siirtyy valon avulla. Tehokkaimmat tietoliikenneverkot perustuvat nykyään valokuiduista koostuviin valokaapeleihin.



Langaton tiedonsiirto tuli mahdolliseksi, kun *Maxwell* keksi sähkömagneettiset aallot. Ensimmäisenä radiosignaaleja lähetti ja otti vastaan *Heinrich Hertz* 1880-luvulla. Hänen vastaanottimensa oli 10 metrin etäisyydellä lähettimestä. Serbialainen *Nicola Tesla* järjesti ensimmäisen julkisen radiolähetyksen vuonna 1893. Häntä pidetään radion keksijänä. Italialainen *Guglielmo Marconi* muodosti vuonna 1901 langattomalla lennättimellä ensimmäisen radioyhteyden Atlantin yli Englannista Yhdysvaltoihin. Ensimmäiset televisiolähetykset aloitettiin Saksassa vuonna 1934, ja Suomen ensimmäinen tv-lähetys oli vuonna 1955. Ensimmäinen automaattinen matkapuhelinverkko avattiin Japanissa vuonna 1979. Pohjoismaissa langaton puhelinliikenne alkoi vuonna 1981, kun rakennettiin puheluja välittävä NMT-verkko (*Nordisk Mobiltelefon*).

Matkapuhelimien toiminta perustuu digitaalisiin **GMS-** ja **UMTS-teknologioihin**, joilla voidaan välittää sekä ääntä että kuvaa. GMS-verkko käyttää Suomessa taajuuksia 900 MHz ja 1800 MHz ja UMTS-verkko taajuuksia 900 MHz ja 2100 MHz. Matkapuhelimet ovat yhteydessä verkkoihin tukiasemien kautta, joita on maaseudulla noin 10 kilometrin välein ja kaupungeissa lähes joka korttelissa. Suuritaajuisia verkkoja on pääasiassa asutuskeskuksissa, koska ne vaativat lyhyemmän kantamansa takia tiheämmän antenniverkoston.

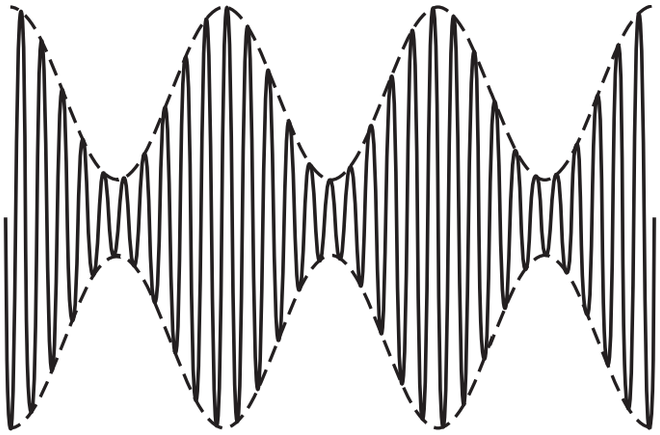
Matkapuhelinverkon tukiaseman antenni.

Lähietäisyyden langattomaan tiedonsiirtoon käytetään esimerkiksi Bluetooth- ja Wi-Fi-järjestelmiä. Bluetooth käyttää 2,45 GHz:n kantoaaltoa, Wi-Fi 2,5 GHz:n ja 5 GHz:n kantoaaltoja. Bluetooth-yhteydellä voidaan korvata matkapuhelimen ja kotitietokoneen kaapelit, kun laitteita halutaan kytkeä toisiinsa tai esimerkiksi tulostimeen. Wi-Fi-järjestelmää käytetään erityisesti kannettavien tietokoneiden yhdistämiseen langattoman lähiverkon WLANin välityksellä internetiin. Infrapunayhteys, jota käytetään esimerkiksi kaukosäätimissä, vaatii toimiakseen suoran näköyhteyden.

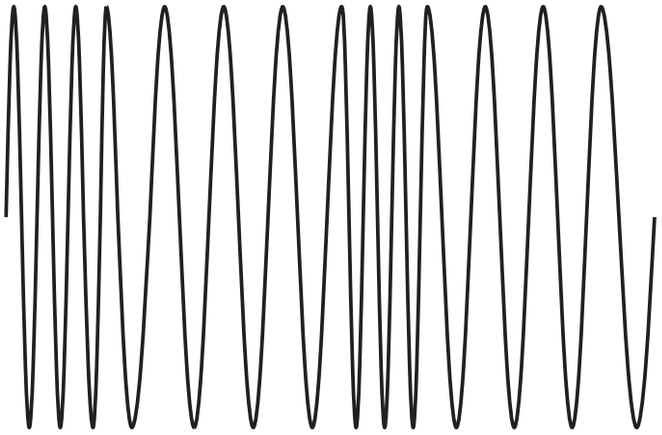
Tietokoneiden välinen tiedonsiirto tapahtuu erilaisten **tietoliikenneverkkojen** avulla. Tunnetuin niistä on maailmanlaajuinen **internet**. Se yhdistää toisiinsa suuren määrän pienempiä tietoverkkoja. Kaikki tieto siirtyy internetissä lähettävästä tietokoneesta vastaanottavaan tietokoneeseen ns. IP-paketeiksi jaettuna. Tietokoneiden välillä ei ole määrättyä suoraa yhteyttä, vaan jokainen paketti ohjautuu vastaanottajalle erikseen seuraten jotakin tietoverkon lukemattomista vaihtoehtoisista reiteistä.

Tiedonsiirron, sähköpostin ja keskustelupalstojen ohella tärkeä internetin palvelumuoto on vuodesta 1990 käytössä ollut **WWW** (*World Wide Web*). WWW kehitettiin Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuslaboratoriossa tieteellisten dokumenttien tehokasta siirtämistä varten. Tietokoneen selainohjelmat etsivät tietoverkosta web-sivuja ja tuovat ne tietokoneen näytölle. Web-sivut laaditaan **hypertekstinä**, jossa voi olla tekstin lisäksi ääntä, kuvia ja videoita sekä linkkejä muihin web-dokumentteihin.

Lautasantennit vastaanottavat geostationaaristen satelliittien välittämiä TV-kanavien lähetyksiä. Geostationaaristen satelliittien kiertoaika on sama kuin Maan pyörähdysaika, joten Maasta katsottuna ne ovat aina samassa suunnassa. Satelliitit ovat noin 36 000 km:n korkeudella, joten Maahan tulevat signaalit ovat heikkoja. Siksi niiden vastaanottamiseen tarvitaan lautasantenneja, jotka kokoavat säteilyä suuremmalta alalta.



Amplitudimoduloitu aalto. Lyhytaaltoinen värähtely on kantoaalto, ja pitkäaaltoinen värähtely (kantoaallon amplitudin vaihtelu) on lähetyssignaali.



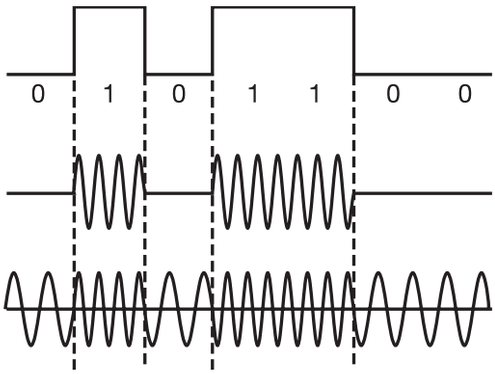
Taajuusmoduloitu aalto. Kantoaallon aallonpituutta muunnellaan lähetyssignaalin tahdissa.

Sähkömagneettisen aallon modulointi

Radio-, televisio- ja puhelinliikenteen signaalit siirtyvät nykyään valtaosin langattomasti radioaaltojen välityksellä. Tiedonsiirto perustuu välitettävän signaalin, esimerkiksi radion äänen ja television kuvan, liittämiseen **kantoaaltoon** muuttamalla kantoaallon rakennetta. Tätä kutsutaan kantoaallon **moduloinniksi**. Kantoaallon taajuus on paljon suurempi kuin välitettävän signaalin taajuus, joten signaali on mahdollista erottaa kantoaallosta vastaanottimessa. Esimerkiksi radioaseman taajuudella tarkoitetaan sen lähettämän kantoaallon perustaajuutta.

Monilla radion taajuusalueilla ja TV-lähetyksissä käytetään amplitudimodulaatiota. Siinä muutetaan kantoaallon amplitudia välitettävän signaalin tahdissa. Taajuusmodulaatiossa taas muunnetaan puolestaan kantoaallon taajuutta signaalin taajuuden mukaisesti. Sitä käytetään esimerkiksi radion ULA-lähetyksissä.

Näiden ns. **analogisten modulointien** lisäksi käytetään **digitaalista modulointia**. Siinä analoginen sähköinen signaali muutetaan ensin digitaaliseen muotoon ottamalla signaalista ”näytteitä” eli esimerkiksi rekisteröimällä amplitudin arvo tietyin aikavälein. Tämä tieto siirretään sitten kantoaaltoon binäärisessä 0/1-muodossa. Modulaatio voidaan toteuttaa amplitudin avulla esimerkiksi niin, että ykköstä vastaa maksimiamplitudi ja nollaa nolla-amplitudi, tai taajuuden avulla niin, että ykköstä ja nollaa vastaa erilainen muutos kantoaallon taajuudessa. Kun näytteitä otetaan alkuperäisestä analogisesta signaalista riittävän tiheästi, voidaan digitaalisessa muodossa välitetystä tiedosta rakentaa vastaanottimessa alkuperäinen signaali uudelleen.



Digitaalinen amplitudimodulaatio ja taajuusmodulaatio binääriselle bittijonolle 0101100.

Pohdi ja etsi

4-18. Perehdy internetin ja hakuteosten avulla a) radion b) television syntyhistoriaan.

4-19. Selvitä, milloin Suomessa
a) aloitettiin radiolähetykset
b) aloitettiin televisiolähetykset
c) internetverkko yleistyi kaikkien käytettäväksi
d) siirryttiin käyttämään matkapuhelimia
e) lähetettiin ensimmäiset tekstiviestit kännykästä toiseen
f) lähetettiin ensimmäiset kuvaviestit kännykästä toiseen
g) ensimmäistä kertaa siirrettiin langattomasti videokuvaa.

4-20. Selvitä,
a) mitä tarkoittaa kanavanippu
b) Suomen digitelevision kanavanippujen taajuusalueet.

4-21. Mitä tarkoitetaan ensimmäisen, toisen ja kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologialla?

4-22. Selvitä, mistä tulevat radiolähetyksiä koskevat nimitykset AM-lähetykset, FM-lähetykset ja ULA-lähetykset.

4-23. Selvitä, mitä tarkoittaa
a) WLAN
b) Wi-Fi
c) Bluetooth.

4-24. GPS (*Global Positioning System*) on satelliittipaikannusjärjestelmä. Selvitä,
a) mihin GPS-paikannus perustuu
b) mitä A-GPS (*Assisted GPS*) tarkoittaa.

Testaa, osaatko

Oikeita vastausvaihtoehtoja voi olla yksi tai useampia.

1. Sähkömagneettinen aalto
a) syntyy varattujen hiukkasten värähtelystä
b) on poikittaista aaltoliikettä
c) etenee valoa nopeammin.

2. *RCL*-piiri on resonanssitilassa. Silloin piirin
a) impedanssi on pienimmillään
b) reaktanssi on nolla
c) resistanssi on nolla.

3. Sähkömagneettisen värähtelypiirin induktanssi on 0,092 H ja kapasitanssi 4,7 nF. Piirin resonanssitaajuus on
a) 7,7 kHz
b) 19 kHz
c) 370 MHz.

4. Vaihtovirtapiirin resonanssissa
a) energiaa sitoutuu vuorotellen kondensaattorin sähkökenttään ja käämin magneettikenttään
b) havaitaan sähkövirran maksimi
c) syntyvää sähkömagneettista säteilyä voidaan vastaanottaa antennilla.

5. Resonanssitilassa piirin
a) kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret
b) induktanssi ja kapasitanssi ovat yhtä suuret
c) taajuus on minimissään.

6. Värähtelypiirin
a) komponentit ovat kondensaattori ja käämi
b) värähtely vaimenee, koska piiristä poistuu energiaa säteilynä
c) värähtelyyn ei vaikuta piirin resistanssi.

7. Mitkä seuraavista väitteistä ovat totta?
a) Dipoliantenni lähettää ja vastaanottaa säteilyä tehokkaimmin resonanssitaajuudellaan.
b) Lautasantennissa käytetään signaalinvahvistusta.
c) Satelliittiantenni toimii röntgensäteilyn taajuudella.

8. Dipoliantennin pituus on 65 cm. Antennin vastaanottamien radioaaltojen taajuus on
a) 170 MHz
b) 230 MHz
c) 460 MHz.

9. Antennin vastaanottaman radioaallon taajuutta voidaan muuttaa
a) antennin pituutta muuttamalla
b) antennin asentoa kääntämällä
c) antennissa olevan kondensaattorin kapasitanssia muuttamalla.

10. Modulaatio tarkoittaa
a) kantoaallon amplitudin tai taajuuden muuttamista lähetyssignaalin tahdissa
b) analogisen signaalin muuttamista digitaaliseksi
c) taajuuskaistan jakamista eri TV-kanaville.

Tiivistelmä

- *RCL*-piirin impedanssi riippuu taajuudesta.
- Resonanssitilassa impedanssi on pienin ja piirissä kulkevalla sähkövirralla on maksimiarvo.
- Resonanssitaajuus on $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
- Sähkömagneettisessa värähtelypiirissä sähkö- ja magneettikentän energiat muuntuvat piirin ominaistaajuudella toisikseen.
- Avoimen värähtelypiirin kiihtyvässä liikkeessä olevat elektronit synnyttävät ympäristöön valonnopeudella etenevää sähkömagneettista aaltoliikettä.
- Radioaalloilla on samat yleiset ominaisuudet (heijastuminen, taittuminen, taipuminen, interferenssi, polarisaatio) kuin valolla. Radioaaltojen aallonpituus on pitempi kuin valon.
- Sähkömagneettisessa säteilyssä sähkö- ja magneettikenttä ovat kohtisuorassa toisiaan ja etenemissuuntaansa vastaan.
- Dipoliantennista lähtevien ja antennin vastaanottamien radioaaltojen aallonpituus on $\lambda = 2l$, jossa l on antennin pituus.

Kertaustehtäviä

Etsi laskemalla oikea vastausvaihtoehto tehtävissä 1–10.

1. Protoni liikkuu oikealta vasemmalle nopeudella 2,6 Mm/s kohtisuorasti magneettikenttää vastaan. Magneettikentän magneettivuon tiheys on 0,14 T. Kenttä on vaakasuora ja suoraan katsojaa kohti. Magneettikentässä protoniin kohdistuva voima on
a) 58 fN alaspäin
b) 0,58 fN ylöspäin
c) 58 fN ylöspäin.

2. Maan magneettikentän magneettivuon tiheys eräällä seudulla on 49 μT, inklinaatio 71° ja deklinaatio 0°. Kentässä on 0,50 m pitkä pystysuora johtimen osa, jossa kulkee 4,0 A:n sähkövirta alaspäin. Maan magneettikentästä aiheutuva magneettinen voima on
a) 93 μN pohjoiseen
b) 32 μN itään
c) 41 μN itään.

3. Protoni tulee nopeudella 1,3 Mm/s homogeeniseen magneettikenttään siten, että nopeuden suunnan ja kenttäviivojen välinen kulma on 12°. Magneettivuon tiheys on 990 mT. Protoniin kohdistuvan magneettisen voiman suuruus on
a) 43 fN b) 200 fN c) 510 fN.

4. Homogeenisessa magneettikentässä on suora virtajohdin. Magneettikenttä ja virtajohdin ovat kohtisuorassa toisiaan vasten. Magneettivuon tiheyden suunta on vaakasuora ja suuruus 0,38 T. Johtimen poikkileikkauksen pinta-ala on 2,0 mm^2 ja johdinmateriaalin tiheys 2,7 g/cm^3. Magneettinen voima ja johtimeen kohdistuva paino pitävät johtimen tasapainossa. Johtimessa kulkevan sähkövirran suuruus on
a) 0,14 A b) 0,19 A c) 0,26 A.

5. Johdintanko liikkuu homogeenisessa magneettikentässä kohtisuorasti kenttää vastaan. Tangon pituus on 45 cm ja magneettikentän magneettivuon tiheys 0,70 T. Kun tangon päiden välille indusoituu 3,0 V:n jännite, sauvan nopeus on
a) 0 m/s b) 9,5 m/s c) 12 m/s.

6. Käämin läpi kulkeva sähkövirta aiheuttaa käämiin 35 μWb:n magneettivuon. Kun käämi irrotetaan jännitelähteestä, virta häviää 15 ms:ssa. Käämissä on 660 kierrosta. Käämiin indusoitunut keskimääräinen jännite on
a) 0 V b) −1,5 V c) 1,5 V.

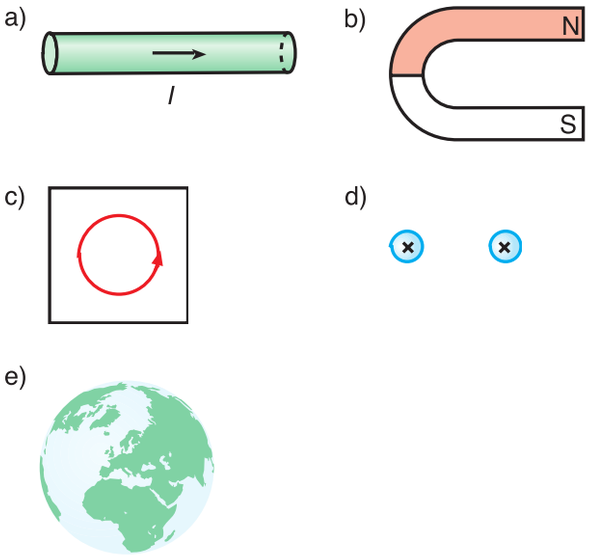
7. Käämin läpi kulkeva sähkövirta pienenee tasaisesti 15 ms:ssa arvosta 5,1 A arvoon 1,5 A. Tällöin käämin napoihin indusoituu 15,5 V:n jännite. Käämin resistanssi on hyvin pieni. Käämin induktanssi on
a) 0,65 mH b) 6,5 mH c) 65 mH.

8. Vaihtovirtapiiriin on kytketty sarjaan vastus ja käämi. Vastuksen resistanssi on 85 Ω, ja käämin induktanssi on 0,25 H. Vaihtovirran taajuus on 50 Hz. Piirin impedanssi on
a) 12 Ω b) 120 Ω c) 1,2 Ω.

9. Muuntajan ensiökäämissä on 1000 kierrosta ja toisiokäämissä 40. Ensiöpuoli kytketään vaihtojännitteeseen, jonka huippuarvo on 350 V. Toisiopuolelle kytketään vastus, jonka resistanssi on 120 Ω. Toisiovirran tehollinen arvo on
a) 82 mA b) 117 mA c) 250 mA.

10. Antennipiirin resonanssitaajuus on 97,7 MHz. Värähtelypiirin induktanssi on 0,15 mH. Kondensaattorin kapasitanssi on
a) 1,7 μF b) 5,5 pF c) 18 fF.

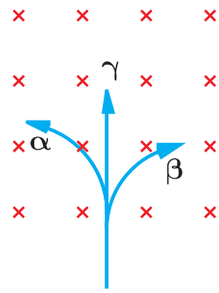
11. Hahmottele magneettikentän suunta ja muoto seuraavissa tilanteissa:
a) suora virtajohdin, jossa kulkee tasavirta I
b) U-magneetin napojen väli
c) magneettikenttä, jossa protoni on ympyräradalla
d) kaksi lähekkäistä virtajohdinta
e) Maan magneettikenttä.



12. a) Mitä tarkoitetaan käsitteillä deklinaatio ja inklinaatio?
b) Mihin perustuu väite ”magneettikenttä suojaa Maata”?
c) Miksi revontulia nähdään yleensä vain napa-alueilla?
d) Millaisia muutoksia Maan magneettikentässä tapahtuu?

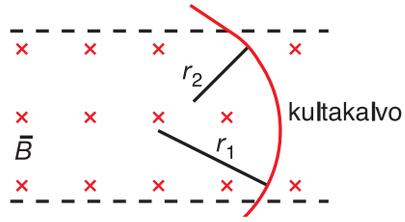
13. a) Syklotronin D-kohtioiden sisällä on homogeeninen magneettikenttä. Miksi ionin rata syklotronissa on spiraalin muotoinen eikä ympyrärata?
b) Syklotronissa kiihdytetään $^3He^{2+}$-ioneja. Niiden suurin liike-energia on 7,0 MeV, ja radan suurin säde on 1,03 m. Laske ionien kiihdyttämisessä käytetyn magneettivuon tiheys sekä syklotronin taajuus.

14. a) Kuvassa näkyy α- ja β-hiukkasen sekä gammakvantin γ radan kaareutuminen magneettikentässä. Mitä tämän perusteella voi päätellä näistä hiukkasista?



b) Kun 32 kV:n jännitteellä kiihdytetyt α-hiukkaset tulevat homogeeniseen magneettikenttään siten, että niiden nopeus on kohtisuorassa kenttäviivoja vastaan, hiukkaset joutuvat r-säteiseen ympyräliikkeeseen. Kuinka suurella jännitteellä protoneja pitäisi kiihdyttää, jotta niiden rataympyrän säde tässä magneettikentässä olisi yhtä suuri?

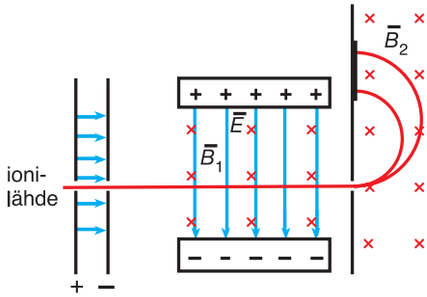
15. Protonisuihku (punainen viiva) osuu kuvion mukaisesti kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään, jonka magneettivuon tiheys on 0,55 T. Protonit läpäisevät kentässä olevan ohuen kultakalvon, jolloin niiden ratakäyrän kaarevuussäde pienenee arvosta $r_1 = 220$ mm arvoon $r_2 = 140$ mm. Laske yhden protonin energian pieneneminen. Laske myös kalvon paksuus, kun kyseisellä energia-alueella protonin keskimääräinen energian menetys pituusyksikköä kohti kullassa on 160 keV/μm.



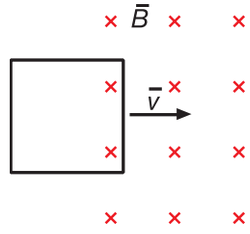
16. Protoni saapuu kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään nopeudella 8,5 Mm/s. Magneettikentän magneettivuo on 3,5 μWb ja kentän leikkauspinta-ala 15 cm^2. Laske protoniin kohdistuvan magneettisen voiman suuruus.

17. Heliumydin eli α-hiukkanen kiertää pitkin ympyrärataa homogeenisessa magneettikentässä. Rata on kohtisuorassa kenttää vastaan. Magneettivuon tiheys on 1,4 T. Laske α-hiukkasen kiertoaika.

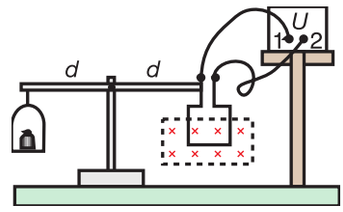
18. a) Mihin massaspektrometria käytetään, ja mihin sen toiminta perustuu?
b) Massaspektrometrin osia ovat mm. ionilähde, nopeusvalitsin ja ilmaisin. Selvitä ko. osien merkitys massaspektrometrin toiminnalle.
c) Miksi saman alkuaineen eri isotoopit saadaan eroteltua massaspektrometrin avulla?



19. a) Kuparijohdin on kohtisuorassa homogeenisen magneettikentän kenttäviivoja vastaan. Johtimen pituus on 4,5 cm, ja siinä kulkee 4,0 A:n sähkövirta. Magneettinen voima vaikuttaa johtimeen 55 mN:n voimalla. Laske magneettivuon tiheyden itseisarvo.
b) Neliön muotoinen metallilankakehikko liikkuu kuvan mukaisesti nopeudella 2,0 m/s ja saapuu magneettikenttään, jonka magneettivuon tiheys on 0,20 T. Kehikon sivun pituus on 6,0 cm ja resistanssi 5,0 mΩ. Kehikon taso leikkaa magneettikentän kohtisuorasti. Kuinka suuri voima tarvitaan tämän liikkeen ylläpitämiseksi, kun kehikko on kuvan osoittamassa asemassa?



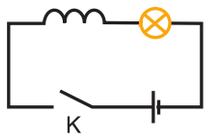
20. Kuvan katkoviivalla merkityn alueen sisällä on homogeeninen magneettikenttä, joka on kohtisuorassa paperin tasoon nähden ja suuntautunut paperin sisään. Kentän magneettivuon tiheys voidaan mitata kuvan vaakasysteemillä, kun kuvan suorakulmainen virtasilmukka, jonka leveys $l = 15$ cm ja korkeus $k = 25$ cm, on osittain tutkittavassa magneettikentässä. Silmukassa kiertävää sähkövirtaa voidaan säädellä tasajännitteellä U. Vaaka on tasapainossa, kun vaakakuppi on tyhjä ja silmukka virraton. Kuvan mukaisessa tasapainotilanteessa vaakakupissa oli 6,5 g:n punnus ja tasajännite U oli 220 V. Silmukan kokonaisresistanssi on 5,0 Ω. Vaa'an varsien pituudet ovat $d = 35$ cm.
a) Selvitä perustellen virtasilmukassa kiertävän virran suunta mittauksen aikana.
b) Laske magneettivuon tiheyden arvo.
[TKK 2003]



21. Mitkä seuraavista väitteistä ovat tosia? Perustele vastauksesi.
a) Alumiini on diamagneettinen aine, joten se heikentää hieman ulkoista magneettikenttää.
b) Voimakkaiden sähkömagneettien käämeissä käytetään suprajohteita, koska tällöin käämiin kerran synnytetty sähkövirta pitää magneettikentän voimakkuuden suurena ja vakiona.
c) Aineen magneettisten ominaisuuksien voimakkuutta kuvaa suhteellinen permeabiliteetti.

Ferromagneettisten aineiden suhteellinen permeabiliteetti voi olla paramagneettisiin aineisiin nähden kymmentuhatkertainen.

22. Missä seuraavista tapauksista havaitaan induktioilmiö? Perustele. Pohdi myös mahdollisen induktiovirran suuntaa.
a) Kestomagneetti pudotetaan johdinsilmukan läpi.
b) Kahdella käämillä on yhteinen rautasydän. Toisessa käämissä kulkee vaihtovirta.
c) Kahdella käämillä on yhteinen rautasydän. Toisessa käämissä kulkee tasavirta.
d) Johdinsilmukka on paikallaan homogeenisessa magneettikentässä. Silmukan asento on kohtisuorassa kenttää vastaan.
e) Johdinsilmukka on heikkenevässä magneettikentässä paikallaan. Silmukan asento on kohtisuorassa kenttää vastaan.
f) Kuvan mukaisessa kytkennässä kytkin K suljetaan.

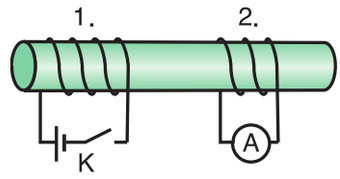


23. Selosta lyhyesti, miten induktioilmiötä käytetään hyväksi
a) muuntajassa
b) induktiojarrussa
c) induktiouunissa.

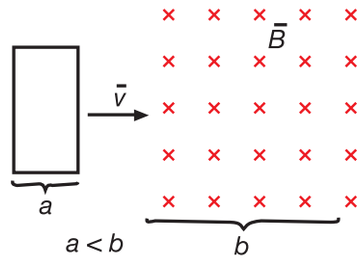
24. Pyörrevirrat ja niiden tekniset sovellukset. [K2010, 8]

25. Vaakasuoraan lentävän raketin hetkellinen nopeus on 450 m/s. Maan magneettikentän magneettivuon tiheys on 12 μT, ja kenttä muodostaa 25°:n kulman pystysuunnan kanssa. Raketin siivenkärkien väli on 27 m. Laske siivenkärkien välille indusoituva jännite.

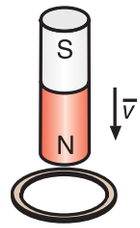
26. a) Miksi oheisen kuvion mukaisessa tilanteessa mittari A osoittaa sähkövirtaa, kun kytkin K suljetaan?



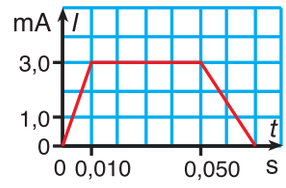
b) Suljettu johdinsilmukka kulkee vakionopeudella magneettikentän läpi oheisen kuvion mukaisesti. Esitä silmukassa kulkeva sähkövirta ajan funktiona (periaatekuvio (t, I)-koordinaatistossa).



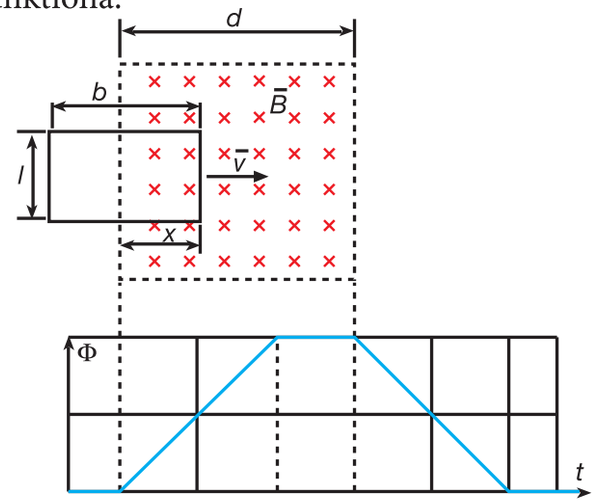
c) Mihin suuntaan sähkövirta kulkee johdinsilmukan etuosassa, kun sauvamagneetti putoaa kuvion mukaisesti silmukkaa kohti?



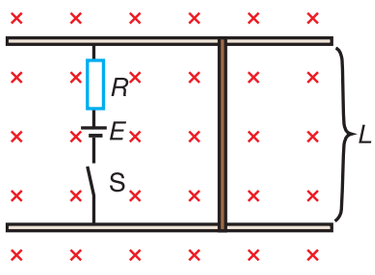
27. Käämin sähkövirtaa mitattiin 0,010 s:n välein. Sähkövirta on esitetty (t, I)-koordinaatistossa. Käämin induktanssi oli 38 mH ja resistanssi pieni. Esitä käämiin indusoitunut jännite (t, e)-koordinaatistossa.



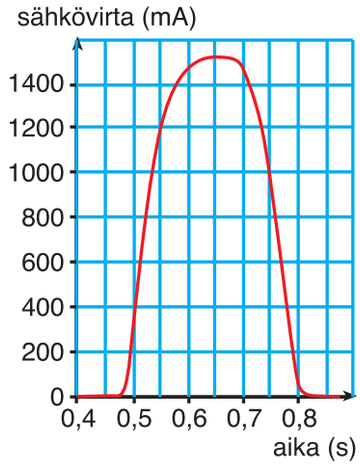
28. Suljettu johdinsilmukka on kuvan mukaisessa kohdassa ja liikkuu vakionopeudella oikealle. Kuvassa on silmukan läpäisevä magneettivuo ajan funktiona. Hahmottele pääpiirteittäin a) silmukkaan indusoitunut jännite b) teho ajan funktiona.



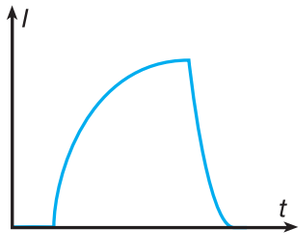
29. Metallitanko, massa $m = 0{,}20$ kg, on johtavilla kiskoilla, jotka ovat etäisyydellä $L = 0{,}25$ m toisistaan (kuva). Tanko pääsee liikkumaan kitkattomasti kiskojen suuntaisesti. Homogeeninen magneettikenttä, jonka magneettivuon tiheys on $B = 1{,}4$ T, on kohtisuorassa paperin tasoon nähden ja suuntautunut paperin sisään. Kiskojen välille on kytketty tasajännitelähde, jonka lähdejännite on $E = 12{,}0$ V, ja suljetun piirin kokonaisresistanssi on $R = 5{,}0\ \Omega$. Kiskojen resistanssi oletetaan mitättömäksi. Kytkin S suljetaan hetkellä $t = 0$ s.
a) Laske tangon kiihtyvyys (suuruus ja suunta) heti katkaisimen sulkemisen jälkeen. Perustele.
b) Perustele, miksi tangon nopeus lähestyy vakioarvoa pitkän ajan kuluttua katkaisimen sulkemisesta. Kuinka suuri on nopeuden vakioarvo? [TKK 2005]



30. a) Miksi induktioliesi ei auta lasivuoassa olevan piirakan sulattamisessa?
b) Kaksi käämiä on kytketty induktiivisesti. Käämiin 1 kytketään tasajännitelähde ja käämiin 2 herkkä jännitemittari. Käämissä 1 kulkeva sähkövirta on esitetty kuvaajassa. Hahmottele perustellen käämiin 2 indusoituneen jännitteen kuvaaja aikavälillä 0,40 s ... 0,85 s.



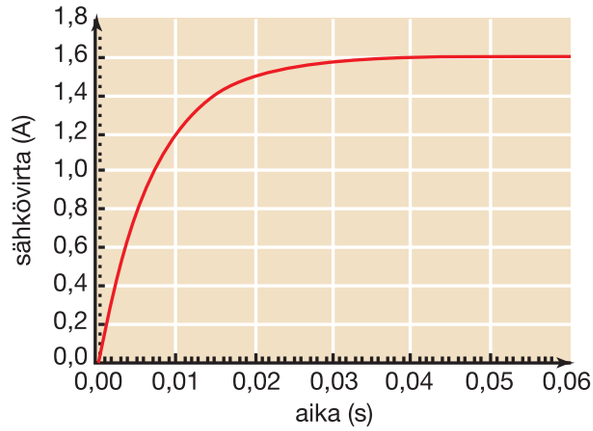
31. a) Käämi ja vastus kytkettiin rinnan ja yhdistettiin katkaisijan välityksellä paristoon. Kun tietokonepohjaisella mittausjärjestelmällä mitattiin käämin läpi kulkenutta sähkövirtaa, saatiin oheinen kuvaaja. Selitä kuvaajan muoto.



b) Liikennevalojen lähelle tiehen on usein upotettu johdinsilmukoita. Miten johdinsilmukoiden avulla voidaan havaita saapuva auto?

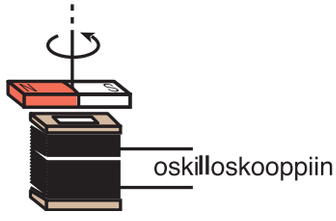
32. Kun käämi kytkettiin tasajännitelähteeseen, jonka lähdejännite oli 7,5 V ja sisäinen resistanssi hyvin pieni, saatiin tietokoneeseen liitettyä virta-anturia käyttäen oheinen kuvio.
a) Selitä, miksi virta muuttuu kuvion mukaisesti.
b) Kuinka suuri on käämin resistanssi?

c) Määritä induktiojännite hetkellä 10 ms ja laske sen perusteella käämin induktanssi. [K2009, 8]

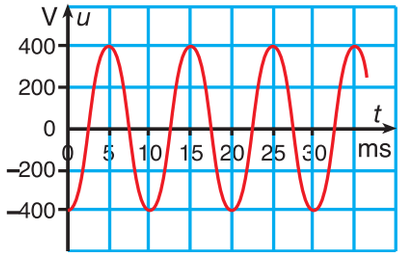


33. Käämin läpi kulkeva sähkövirta pienenee tasaisesti arvosta 2,6 A nollaan ajassa 4,0 ms. Tällöin käämiin indusoituu keskimäärin 3,8 V:n suuruinen jännite. Kuinka paljon energiaa käämin magneettikenttään oli alun perin varastoitunut?

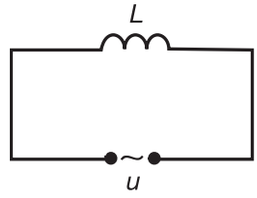
34. a) Kun langassa riippuva sauvamagneetti saatetaan pyörimään käämin yläpuolella, käämiin indusoituu (likimain) sinimuotoinen vaihtojännite. Selitä ilmiö. Mitä tapahtuu, jos magneettia siirretään 1° ylemmäs ja 2° sivulle?



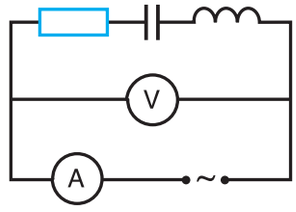
b) Määritä kuvassa esitetyn vaihtojännitteen tehollinen arvo ja taajuus.

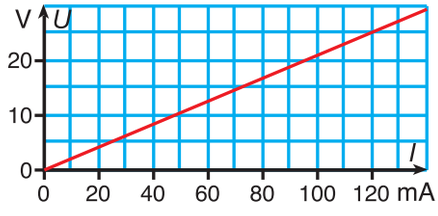


35. Käämi, jonka induktanssi on 0,20 H, kytketään vaihtojännitteeseen, jonka taajuus on 50 Hz. Tehollinen jännite on 10,0 V. Käämin ja koko piirin resistanssi on hyvin pieni. Laske
a) piirin impedanssi
b) käämissä kulkevan sähkövirran tehollinen arvo
c) sähkövirran huippuarvo.



36. a) Kuvan mukaisessa kytkennässä vaihtojännitteen taajuus pidettiin vakiona mutta napajännitettä muutettiin. Määritä kuvaajassa olevien mittaustulosten perusteella kyseisen *RCL*-piirin impedanssi.



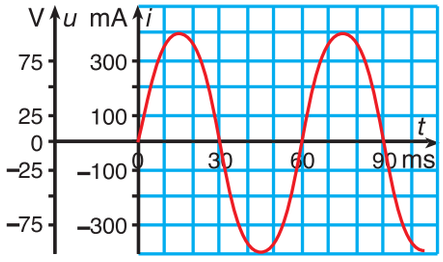


b) Tee selkoa suureiden resistanssi, impedanssi ja reaktanssi eroista ja yhtäläisyyksistä.

37. Käämi pyörii kulmanopeudella 314 rad/s homogeenisessa magneettikentässä, jonka magneettivuon tiheys on 0,30 T. Käämin johdinsilmukan pinta-ala on 85 cm^2, ja kierroksia on 25. Laske indusoituneen jännitteen huippuarvo ja tehollinen arvo.

38. Vaihtojännitelähteeseen kytketään vastus, kondensaattori tai käämi. Millaisessa kytkennässä jännitehäviön ja sähkövirran välinen vaihe-ero φ voi olla
a) $0°$ b) $+90°$ c) $-90°$ d) $0° < \varphi < +90°$?
Mistä vaihe-ero tapauksissa b–d johtuu?

39. Vaihtovirtapiirissä kulkeva sähkövirta on esitetty $i = i(t)$ -kuvaajassa. Piirin impedanssi on 175 Ω ja vaihe-ero 0,524 rad. Piirrä samaan kuvaajaan jännitelähteen napajännite ajan funktiona.



40. a) Käämin 1) induktanssi 2) vaihtovirran taajuus muuttuu kaksinkertaiseksi. Miten muuttuu käämin induktiivinen reaktanssi?
b) Vaihtovirtapiiriin kytketyn käämin induktanssi on 0,25 H. Vaihtovirran taajuus on 50 Hz. Laske käämin induktiivinen reaktanssi.

41. Käämiin, jonka induktanssi on 0,22 H, kytketään vaihtojännite. Sen tehollinen arvo on 15 V ja taajuus 50 Hz. Käämin resistanssi on hyvin pieni. Laske käämissä kulkevan sähkövirran tehollinen arvo.

42. Vaihtovirtapiiriin kytketään sarjaan vastus, käämi ja kondensaattori. Piirin resistanssi on 450 Ω, induktiivinen reaktanssi 654 Ω ja kapasitiivinen reaktanssi 350 Ω. Laske piirin impedanssi. Kuinka suuri on napajännitteen tehollinen arvo, kun sähkövirran tehollinen arvo on 50,0 mA?

43. a) Vaihtovirtapiirissä on vain käämi, jonka resistanssi on 65 Ω. Piirin impedanssi on 236 Ω. Laske käämin reaktanssi.
b) Selitä, mistä käämissä aiheutuu sähkövirran jääminen jännitehäviön jälkeen.
c) Selitä, mistä kondensaattorissa aiheutuu jännitehäviön jääminen sähkövirran jälkeen.

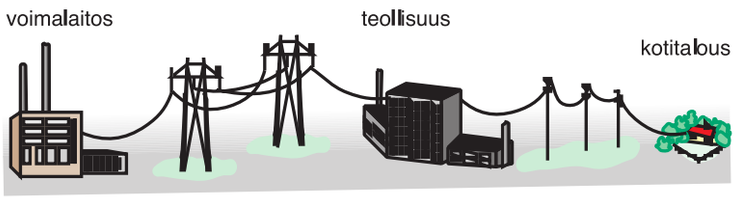
44. Vedenkeitin on kytketty verkkojännitteeseen, ja sen sähköteho on 2,1 kW ja hyötysuhde 0,92. Kuinka kauan kestää, kun keitin kuumentaa 0,75 kg (0,75 l) vettä 12 °C:n alkulämpötilasta kiehuvaksi?

45. a) Vaihtovirtapiiriin kytketyssä vastuksessa, jonka resistanssi on 35 Ω, sähkövirran huippuarvo on 6,2 A. Laske keskimääräinen teho, jolla sähkövirta lämmittää vastusta.
b) Pistorasian tehollinen jännite on 230 V. Kuinka suuri on jännitteen huippuarvo?
c) Mitä tarkoitetaan sähkönjakeluverkon voimavirralla?

46. Muuntajan ensiöpuolen käämissä on 1200 kierrosta ja toisiopuolen käämissä 6 kierrosta. Ensiöpuoli kytketään pistorasiaan.
a) Laske toisiopuolen jännite.
b) Mitä tapahtuu rautanaulalle, jolla yhdistetään muuntajan toisiopuolen navat?

47. a) Muuntajan tehohäviöistä käytetään joskus myös nimityksiä kuparihäviö ja rautahäviö. Mitä nimitykset tarkoittavat?
b) Miksi muuntajan rautasydän kannattaa valmistaa ohuista, toisistaan eristetyistä metalliliuskoista?

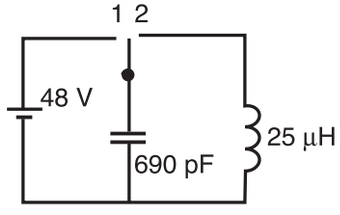
48. Merkitse kuvaan sähkönsiirrossa tarvittavien muuntajien paikat ja käytetyt jännitteet. Miksi jännitettä on tarpeen vaihdella?



49. Selvitä, millaisella koejärjestelyllä *RCL*-piirin resonanssin voi havaita. Mitä välineitä tarvitset? Miten tutkimus tehdään? Miten resonanssi havaitaan? Mistä resonanssi johtuu?

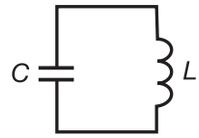
50. Radion vastaanottopiirissä säätökondensaattorin kapasitanssi on 32 fF. Kuunneltavan kanavan taajuus on 89,9 MHz. Laske antennipiirin induktanssi.

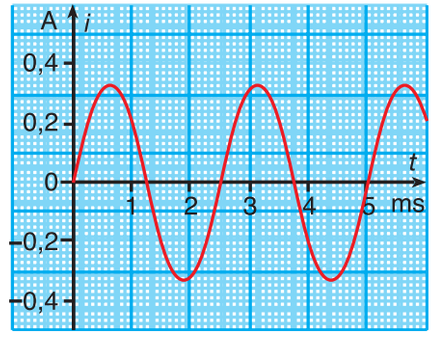
51. Kondensaattori ladataan kytkimen ollessa asennossa 1.
a) Mitä tapahtuu, kun kytkimen asennoksi vaihdetaan 2? Johtimet oletetaan vastuksettomiksi.
b) Laske *LC*-piirissä kulkevan virran suurin arvo.
c) Laske piirin lähettämän sähkömagneettisen aallon aallonpituus.



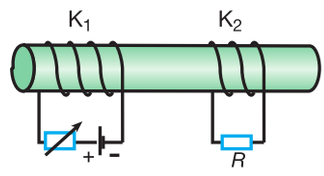
52. a) Selosta dipoliantennin rakenne.
b) Minkä pituinen on hyvä dipoliantenni, jos halutaan kuunnella radiolähetystä taajuudella 95,7 MHz?
c) Miten teknisesti on ratkaistu eri radiotaajuuksien kuunteleminen samalla radiovastaanottimella?

53. Kuvan värähtelypiirissä käämin induktanssi on 7,2 mH ja resistanssi hyvin pieni. Käämissä kulkeva virta riippuu ajasta oheisen kuvion mukaisesti.
a) Kuinka suuri on kondensaattorin kapasitanssi?
b) Kuinka suuri täytyy kondensaattorin läpilyöntikestävyyden vähintään olla? [S2002, 8]





54. Käämien induktiivisessa kytkennässä käämin K_2 läpi menevä magneettivuo on verrannollinen käämissä K_1 kulkevaan sähkövirtaan. Käämiin K_2 indusoitunut jännite e_2 on $e_2 = -M\dfrac{\Delta I_1}{\Delta t}$, jossa M on keskinäisinduktanssi. Kuvan kytkennässä käämien K_1 ja K_2 keskinäisinduktanssi on 2,5 mH. Käämin K_1 sähkövirta pienennetään tasaisesti arvosta 1,8 A arvoon 0,30 A ajassa 0,90 s. Perustele tarkasti oikeanpuoleisessa piirissä kulkevan sähkövirran suunta ja laske induktiovirta, kun piirin resistanssi on 24 Ω.



Vastauksia

1 Magneettikenttä

1-21. a) 3,6 fN etelään b) 2,2 fN oikealle
1-22. 0,17 MV/m, alas
1-23. 2) 14 mT
1-24. 0,40 kV
1-25. a) 0,36 fN oikealle
b) 0,20 m
c) 0,14 μs
1-26. 0,21 T
1-27. a) 0,76 m b) 0 m/s c) 0,48 μs
1-28. −45 kV
1-29. a) 4,2 MeV b) 6,9 MHz
1-30. a) 11 MHz b) 1,4 T
1-31. b) 0,529 T
1-32. 0,30 T
1-33. a) 150 mT
1-39. b) $9{,}2 \cdot 10^{-6}$ N, vastakkaissuuntaiset
1-41. a) 0,13 mN, ylös b) 15 mT
1-42. 33 mA oikealle
1-43. 0,50 N etelään, 18° vaakatasosta alaspäin
1-44. 32 μN itään
1-45. 200 μT, 20 μT, 2 μT
1-46. b) 37 mA
1-47. 2) edestä taaksepäin, 6,7 mN
1-51. a) 0,011 Nm b) 0,010 Nm
1-52. 8,9 Nm
1-53. 30°
1-54. a) 0,0022 Nm b) 30 mT

Testaa, osaatko s. 51
1. b c **2.** a c **3.** a c **4.** a **5.** c **6.** b
7. a **8.** a **9.** c

2 Induktio

2-11. 0,40 V, vasen kärki
2-12. 0,17 V
2-13. 1,0°
2-14. 0,66 mV, alempi
2-15. 140 μA, piirissä myötäpäivään
2-16. a) vasemmalle b) 1,3 m/s c) 21 mN
2-17. a) 250 m/s b) 6,0 mN c) ylös
2-18. a) 0,22 Ω b) 1,5 J
2-25. a) 0,073 Wb b) 0,066 Wb
c) pienenevät
2-26. a) 23 V b) 0,83 mA
2-27. a) 23 V b) 7,7 mA
2-29. a) −0,75 μV b) −0,63 μV
2-30. a) 8,0 μV b) 5,3 mA
c) 0,27 μN oikealle
2-37. 0,40 V
2-38. a) −2,5 V b) 0,80 H
2-39. 3,1 H
2-42. 1,3 kV
2-43. b) 5,2 Ω c) 2,1 V ja 0,21 H
2-44. a) kasvamassa b) 6 A/s
2-45. a) −0,12 V b) 0,072 J
2-46. 1,2 A
2-53. b) 50 r/s c) 32 V d) 8,1 T
2-54. a) 0,20 V b) 0 V c) 17 mA, 15 mA
2-55. a) 540 V b) 27 A

Testaa, osaatko s. 93
1. a b **2.** c **3.** b **4.** c **5.** c **6.** b
7. b **8.** a b c

3 Vaihtovirta

3-1. a) $u_0 = 0{,}24$ V, $T = 6{,}8$ ms,
$f = 150$ Hz b) 11 Ω c) 0,17 V
3-2. a) 4,0 V b) 2,8 V c) 0,020 s d) 50 Hz
3-3. a) 330 V b) ei
3-4. a) 100 Ω b) 190 kJ c) 90 V
3-5. a) 7,1 A b) 10 A
3-6. 92 mA
3-7. b) 120 Ω c) 290 Ω
3-8. a) induktanssista b) 3) 54°
3-9. a) punainen käyrä
b) $-\frac{\pi}{2}$ c) 880 Ω
3-10. b) 0,7 ms, 1,7 ms ja 2,6 ms
3-11. a) pysyy samana b) kasvaa
c) pienenee
3-12. a) pienenee
3-13. kasvaa
3-14. kasvaa
3-16. a) 2,1 A b) 3,0 A c) 0 A
3-17. 0,24 H
3-18. 0,59 A
3-19. 140 μF
3-20. a) 23 mA b) 450 mA
3-21. a) 6,7 Ω b) 39 mA
c) 0,37 V d) $\pm\, n \cdot 10{,}0$ μs, $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$
3-22. b) suurenee
3-24. 78 Hz
3-25. 0,82 A, 1,2 A, 0 A
3-26. b) 11 μF
3-27. a) 150 Ω b) 1,5 A
3-28. a) 1,6 A
b) $U_R = 78$ V, $U_L = 79$ V, $U_C = 160$ V
3-29. a) 4,8 Ω b) 4,9 mH c) 22 mA
3-30. a) −0,47 rad b) 0,73 rad
3-31. a) 1: vastus, 2: käämi, 3: kondensaattori
b) 7,5 Ω, 66 μF, 7,5 mH
3-33. 3) 1700 W ja 62 Ω
3-34. a1) 3,9 A a2) 5,5 A
a3) 59 Ω a4) 0 rad b) 1,4 €
3-35. a) 0,64 rad, käämin itseinduktiosta
b) 0,48 A c) 46 W
3-36. a) 6,1 A b) 32 Ω c) 37 Ω, 20 Ω
3-37. a) käämi b) 0,79 rad c) 5,7 mW
3-38. 7,4 A, 10 A
3-39. 1,3 rad
3-41. a) 100 I
3-42. 260
3-43. 1) 3,3 V
3-44. a) 4,6 kV
3-45. 0,58
3-46. a) 15 A b) 26 A c) 16 A

Testaa, osaatko s. 145
1. b c **2.** a **3.** b **4.** c **5.** c **6.** c **7.** c
8. b **9.** b c **10.** a b c

4 Sähkömagneettinen värähtelypiiri

4-1. 36 kHz
4-2. 0,18 fF
4-3. b) 350 Hz c) 300 Ω, 0,65 H
4-4. 58 mA
4-5. 0,21A
4-6. a) 2,4 pF, 5,00 Ω b) 5,4 Ω
4-7. a) ei b) kyllä c) kyllä
4-12. a) 150 MHz b) 3,3 ms
4-13. a) 17 cm b) 7,1 cm
4-14. 75 m – 380 m
4-15. retkeilijä
4-16. b) 120 km/h
4-17. a) 0,013 m b) 22 GHz

Testaa, osaatko s. 168
1. a b **2.** a b **3.** a **4.** a b c **5.** a **6.** a b
7. a b **8.** b **9.** a c **10.** a

Kertaustehtävät

1. c) 58 fN
2. b) 32 μN itään
3. a) 43 fN
4. a) 0,14 A
5. b) 9,5 m/s
6. c) 1,5 V
7. c) 65 mH
8. b) 120 Ω
9. a) 82 mA
10. c) 18 fF
13. b) 0,32 T ja 3,3 MHz
14. b) 64 kV
15. 420 keV, 2,6 μm
16. 3,2 fN
17. 93 ns
19. a) 0,31 T b) 58 mN
20. b) 9,7 mT
22. kaikki paitsi d
25. 0,13 V
29. a) 4,2 m/s^2 oikealle b) 34 m/s
32. b) 4,7 Ω c) 1,9 V, 34 mH
33. 20 mJ
34. b) 280 V, 100 Hz
35. a) 63 Ω b) 0,16 A c) 0,23 A
36. a) 210 Ω
37. 20 V, 14 V
40. b) 79 Ω
41. 0,22 A
42. 540 Ω, 27 V
43. a) 230 Ω
44. 2 min 20 s
45. a) 670 W b) 330 V
46. a) 1,2 V
50. 0,098 mH
51. b) 250 mA c) 250 m
52. b) 1,6 m
53. a) 22 μF b) 6,0 V
54. vastuksessa *R* oikealta vasemmalle, 0,17 mA

Hakemisto

aallonpituus 160
alkeisalue 12
alkeismagneetti 12
ampeeri 43
avoin värähtelypiiri 159

Biot'n ja Savartin laki 38

Curie-lämpötila 21

deklinaatio 18
diamagneettinen aine 22
dipoliantenni 159

ensiökäämi 127
estosuunta 119
eteläkohtio 10
etävuorovaikutus 10

ferromagneettinen aine 19

generaattori 87

homogeeninen magneettikenttä 16
huippuarvo 98, 101
huipputeho 102
hyötysuhde 131

ideaalinen muuntaja 130
impedanssi 105
induktanssi 76, 123
induktiivinen reaktanssi 107, 113
induktiolaki 60, 67
induktiovirta 57
inklinaatio 18
itseinduktio 74
itseinduktiojännite 74, 75

jännitehäviö 101
jäännösmagnetismi 20

kapasitanssi 123
kapasitiivinen reaktanssi 108, 115
keskimääräinen sähköteho 102
kolmivaihevirta 133
kompassineula 15
kondensaattori 107, 109
käämi 46, 78, 106, 109

langaton tiedonsiirto 165
Lenzin laki 58
lähdejännite 89

Maan magneettikenttä 18
magneetti 10
magneettikenttä 14, 17, 37, 41, 49
magneettikentän energia 78
magneettinen voima 10, 25
magneettinen vuorovaikutus 10, 40
magneettisesti kova aine 20, 21
magneettisesti pehmeä aine 20, 21
magneettivuo 65
magneettivuon tiheys 16
magnetoituminen 11, 13
massaspektrometri 32
Maxwellin yhtälöt 148
metallinilmaisin 85
modulointi 166
momentti 47, 49
muuntaja 127

N-kohtio 10

oikean käden sääntö 26, 40, 46
ominaistaajuus 153

paramagneettinen aine 21
permeabiliteetti 20
pohjoiskohtio 10
projektio 61
pyörrevirta 83, 84
pätöteho 124
pääjännite 134
pääkytkin 142
päästösuunta 119

rautasydän 13
RCL-piiri 115
resistanssi 123
resonanssi 150
resonanssitaajuus 152
ryhmäkeskus 142

sarjaresonanssitila 151
S-kohtio 10
suhteellinen permeabiliteetti 20
sulake 142
suljettu värähtelypiiri 153
suojakosketinpistorasia 143
suojamaadoitus 143
syklotroni 30
sähkömagneettinen aalto 148
sähkömagneettinen induktio 56
sähkömagneettinen värähtelypiiri 153
sähköverkko 138
sähkövirta 101

tasasuuntaus 118
tasasuuntaussilta 119
tasavirtapiiri 106
tehohäviö 140
tehollinen arvo 100, 103
tehonkulutus 100
toisiokäämi 127
tyhjiön permeabiliteetti 20
tähtikytkentä 133
uusiutumaton luonnonvara 136
uusiutuva luonnonvara 137
vaihe-ero 109
vaihejohdin 133
vaihejännite 134
vaihtojännite 88, 98
vaihtovirta 98
vaihtovirtapiiri 107
vastus 100
virtajohdin 37
yhteistuotantolaitos 137

Valokuvat

s. 7	SKOY/SPL
s. 8 vas	SKOY/Photo Researchers
s. 8 oik.	iStockphoto
s. 9 vas.	iStockphoto
s. 9 oik.	iStockphoto
s. 10 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 10 kesk.	Sampsa Kaijaluoto
s. 10 oik.	Arsi Ikäheimonen
s. 11 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 11 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 13	Sampsa Kaijaluoto
s. 14 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 14 oik.	Arsi Ikäheimonen
s. 15 vas. ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 15 oik. ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 15 vas. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 15 kesk. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 15 oik. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 16 vas.	iStockphoto
s. 16 oik.	iStockphoto
s. 17 vas.	SKOY/SPL
s. 17 oik.	SKOY/Photo Researchers
s. 19 ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 19 alh.	SKOY/SPL
s. 20	SKOY/SPL
s. 21	SKOY/SPL
s. 22 vas.	SKOY/Photo Researchers
s. 22 oik.	SKOY/SPL
s. 23 vas. ylh.	SKOY/Corbis/Liu Liqun
s. 23 oik. ylh.	NASA
s. 23 vas. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 23 oik. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 24	SKOY/Corbis/Gabe Palmer
s. 25	Sampsa Kaijaluoto
s. 28	SKOY/Photo Researchers
s. 29	Kuvaliiteri/Ismo Pekkarinen
s. 30	SKOY/SPL
s. 31 vas.	SKOY/SPL
s. 31 oik.	SKOY/SPL
s. 37 ylh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 37 alh. vas.	SKOY/Photo Researchers
s. 37 alh. oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 38	Sampsa Kaijaluoto
s. 39 ylh.	iStockphoto
s. 39 kesk.	Sampsa Kaijaluoto
s. 39 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 43	Sampsa Kaijaluoto
s. 47	Sampsa Kaijaluoto
s. 49	SKOY/SPL
s. 53	iStockphoto
s. 54 vas. ylh.	iStockphoto
s. 54 oik. ylh.	iStockphoto
s. 54 alh.	SKOY/Kuvaryhmä
s. 55 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 55 kesk.	Arsi Ikäheimonen
s. 55 oik.	Sampsa Kaijaluoto
s. 57	Sampsa Kaijaluoto
s. 59	Sampsa Kaijaluoto
s. 62	iStockphoto
s. 73	Sampsa Kaijaluoto
s. 74 vas.	Sampsa Kaijaluoto
s. 74 oik.	SKOY/SPL
s. 76	iStockphoto
s. 78	CERN
s. 82 ylh.	iStockphoto
s. 82 vas. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 82 kesk. alh.	Arsi Ikäheimonen
s. 82 oik. alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 84	Sampsa Kaijaluoto
s. 85	iStockphoto
s. 86	Sampsa Kaijaluoto
s. 87 vas. ylh.	TVO
s. 87 oik. ylh.	iStockphoto
s. 87 alh.	Sampsa Kaijaluoto
s. 95	iStockphoto
s. 96 vas. ylh.	iStockphoto
s. 96 oik. ylh.	iStockphoto
s. 96 alh.	iStockphoto
s. 97 vas.	iStockphoto
s. 97 oik.	SKOY/Corbis

s. 98 ylh. Sampsa Kaijaluoto
s. 98 vas. alh. Arsi Ikäheimonen
s. 98 oik. alh. Arsi Ikäheimonen
s. 99 Sampsa Kaijaluoto
s. 100 Sampsa Kaijaluoto
s. 102 ylh. Sampsa Kaijaluoto
s. 102 alh. Arsi Ikäheimonen
s. 103 Sampsa Kaijaluoto
s. 104 Sampsa Kaijaluoto
s. 105 iStockphoto
s. 106 ylh. iStockphoto
s. 106 kesk. Arsi Ikäheimonen
s. 106 alh. Arsi Ikäheimonen
s. 108 Arsi Ikäheimonen
s. 112 Arsi Ikäheimonen
s. 115 Arsi Ikäheimonen
s. 116 iStockphoto
s. 118 vas. ylh. iStockphoto
s. 118 oik. ylh. iStockphoto
s. 118 alh. Sampsa Kaijaluoto
s. 119 Sampsa Kaijaluoto
s. 123 vas. iStockphoto
s. 123 oik. iStockphoto
s. 127 ylh. iStockphoto
s. 127 alh. Sampsa Kaijaluoto
s. 129 Sampsa Kaijaluoto
s. 130 Arsi Ikäheimonen
s. 131 iStockphoto
s. 133 Sampsa Kaijaluoto
s. 134 vas. iStockphoto
s. 134 oik. IS-VET
s. 135 vas. Sampsa Kaijaluoto
s. 135 oik. Sampsa Kaijaluoto
s. 136 iStockphoto
s. 137 vas. iStockphoto
s. 137 oik. iStockphoto
s. 138 vas. TVO
s. 138 2. vas. Rodeo.fi/Tuomas Marttila
s. 138 3. vas. Rodeo.fi/Keijo Lotvonen
s. 138 oik. Rodeo.fi/Pedacom
s. 139 vas. iStockphoto
s. 139 oik. iStockphoto
s. 140 vas. Sampsa Kaijaluoto
s. 140 oik. Sampsa Kaijaluoto
s. 142 vas. ylh. iStockphoto
s. 142 oik. ylh. iStockphoto
s. 142 alh. Raimo Havukainen
s. 143 vas. ylh. Lehtikuva/
s. 143 kesk. ylh. iStockphoto
s. 143 oik. ylh. iStockphoto
s. 143 vas. alh. iStockphoto
s. 143 oik. alh. Sampsa Kaijaluoto
s. 144 ylh. www.kuvakori.fi
s. 144 alh. Sampsa Kaijaluoto
s. 147 iStockphoto
s. 148 vas. iStockphoto
s. 148 oik. iStockphoto
s. 149 iStockphoto
s. 150 Arsi Ikäheimonen
s. 158 Sampsa Kaijaluoto
s. 160 vas. iStockphoto
s. 160 oik. iStockphoto
s. 161 SKOY/Photo Researchers
s. 163 vas. iStockphoto
s. 163 oik. iStockphoto
s. 164 ylh. SKOY/Corbis
s. 164 vas. alh. iStockphoto
s. 164 oik. alh. iStockphoto
s. 165 ylh. Heikki Lehto
s. 165 alh. iStockphoto
s. 167 iStockphoto